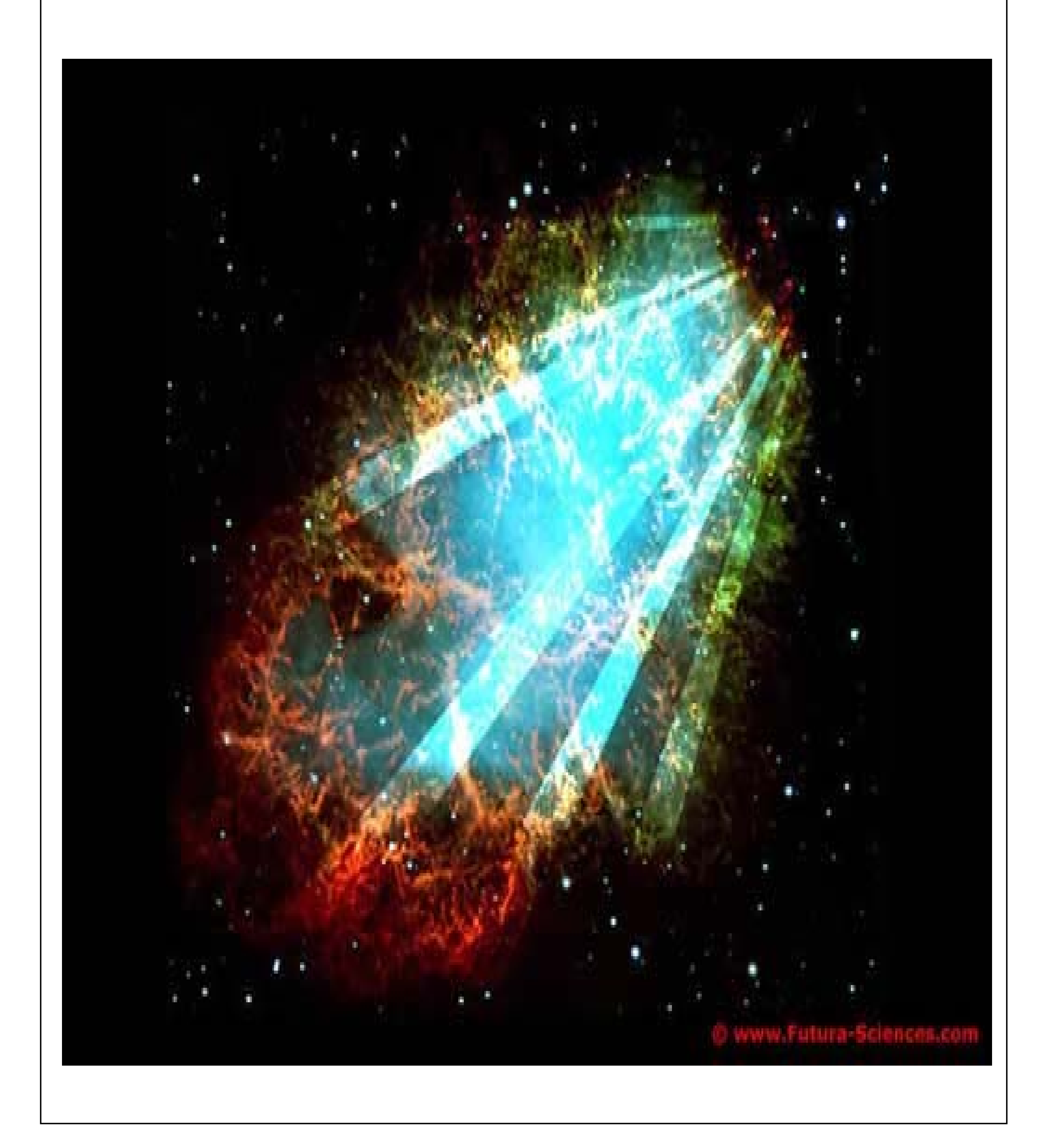
S.BENSAADA

METAUX ET ALLIAGES FERREUX



PREFACE

La genèse d'une innovation technologique est constituée par l'ensemble des faits scientifiques et techniques qui ont concouru à sa formation. La connaissance approfondie de cette phase préalable, difficile à observer quand elle est en cours, mais pourrait se reconstituer, à posteriori, est essentielle pour tenter de prévoir et de diriger le flux des changements techniques tout le long des différentes étapes des développements scientifiques. Les matériaux en général et les métaux en particulier constituent un rôle important pour tout développement industriel ou progrès technologique. Une grande partie de l'activité économique des pays industrialisés est rattachée aux matériaux. Vu les exigences de l'industrie moderne, de nombreux programmes de recherche sont en route pour le développement d'autres matériaux plus performants et moins coûteux tels que les composites, les céramiques, les polymères etc.…, mais les alliages métalliques occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches.

Les propriétés d'emploi des métaux et alliages sont déterminées en grande partie par la morphologie et le degré de dispersion des phases qui les constituent, c'est-à-dire par la microstructure. Aujourd'hui maîtriser les microstructures en vue d'optimiser telle ou telle propriété est réalisable par des traitements thermiques ou thermomécaniques appropriés, qui sont fondés sur les possibilités de transformations structurales.

Cet ouvrage traite les fondements technologiques de l'élaboration des métaux non ferreux, leurs désignations ainsi que leurs transformations et les traitements thermiques à subir. Elle expose profondément les aspects purement métallurgiques des sciences des matériaux. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques et des opérations nécessaires à l'extraction, à l'élaboration et à l'affinage des métaux légers et leurs alliages.

L'auteur

1. Notions de cristallographie

La cristallographie est une science qui étudie les cristaux c-a-d la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. Le mot cristal à son origine grec—►glace. C'est au *19*^{ème}siècle que la cristallographie se dégagea progressivement de la minéralogie et se rapprocha de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante. Les figures 1 et 2 représentent respectivement :

- des cristaux de neige.
- des cristaux de bloc d'aluminium refroidit, dont la surface est polie et attaquée par un agent chimique, les cristaux allongés sur le contour à partir desquels le refroidissement est parti et les petits grains de cristaux au cœur.

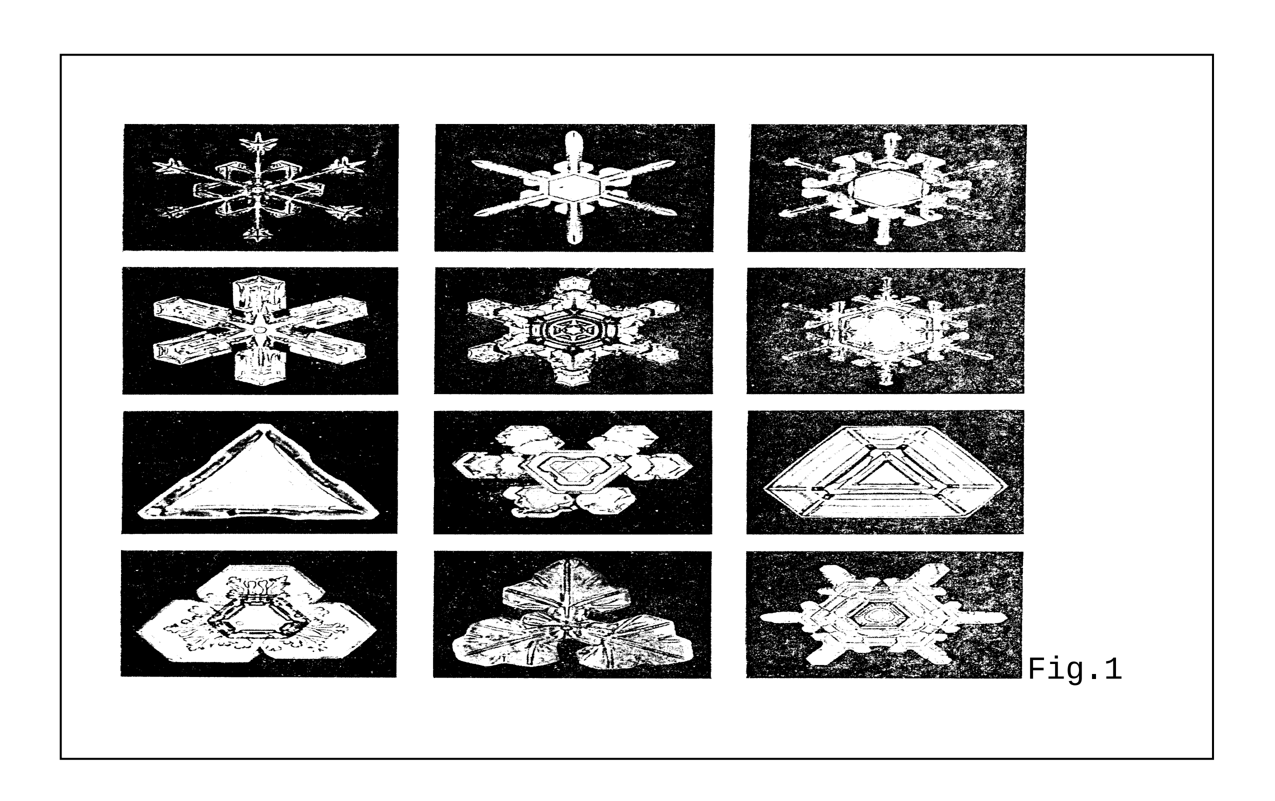


Fig.1

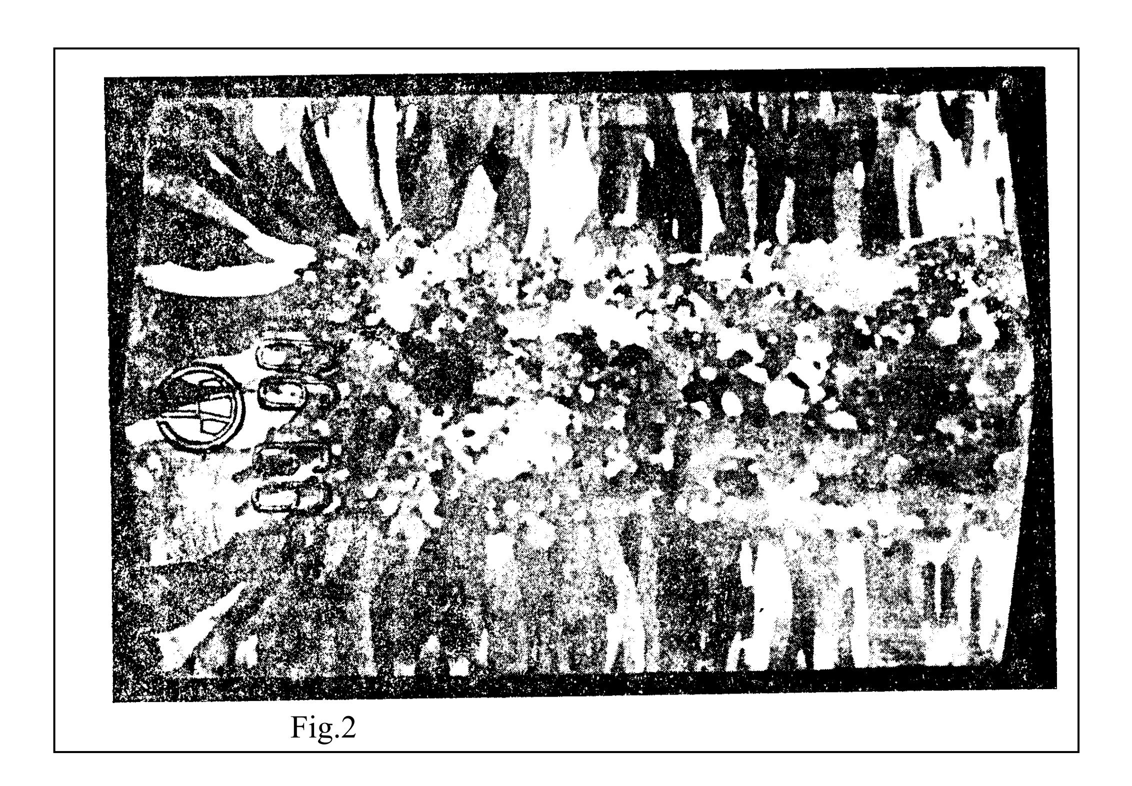


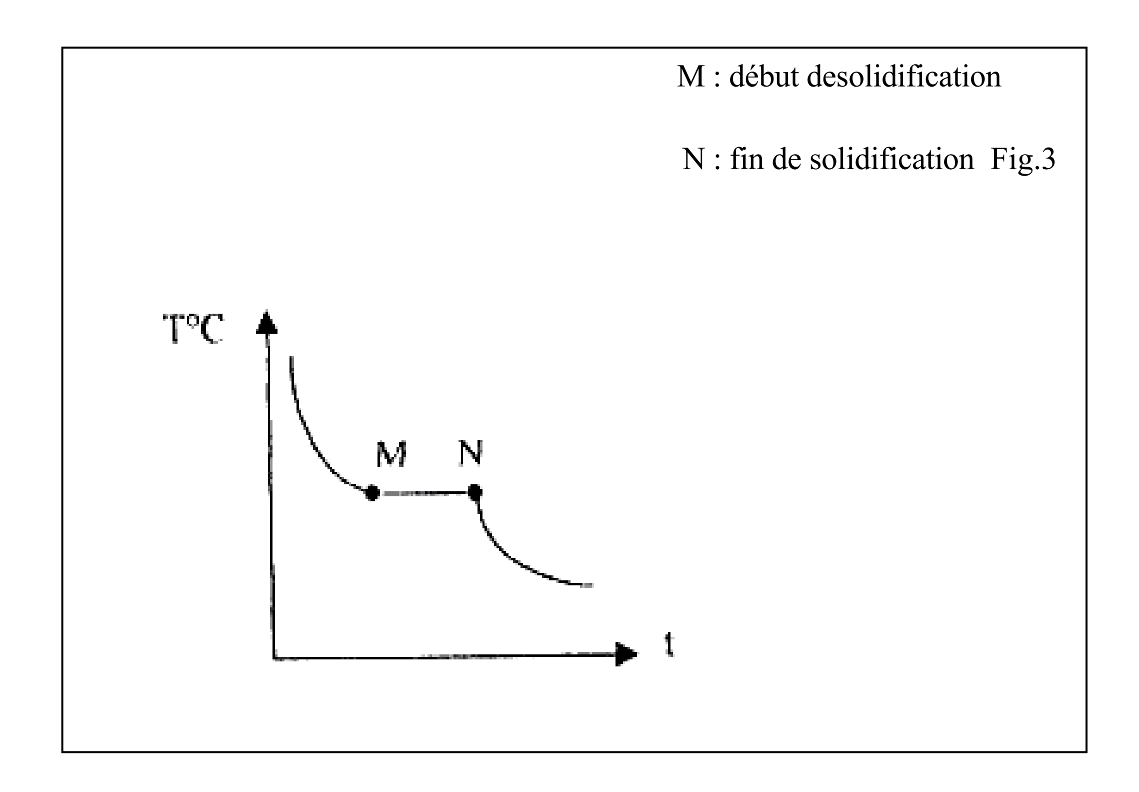
Fig.2

1.1.Corps cristallins et corps amorphes

Par structure cristalline on entend l'arrangement des atomes dans un cristal. Un cristal est défini comme étant un corps solide qui a une structure réticulaire et se composant d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se produit périodiquement dans les trois dimensions. L'absence de structure réticulaire caractérise le corps amorphe. Les propriétés des corps amorphes diffèrent largement de celle des corps cristallin. Les corps amorphe sont caractérisés par la disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle, ils sont assimilés à des liquides figés.

Les corps amorphes sont caractérisés par :

- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée.
- L'isotropie (mêmes propriétés dans les différentes directions) surtout les propriétés physiques.
- On trouve ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallin, le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue (fig.3) :



Tandis que celui des corps cristallin présente un palier en température qui marque début et fin de solidification (cristallisation) : Tous les corps solides peuvent être amorphes ou cristallins, il existe un grand nombre de corps solides amorphes. Les verres représentent un exemple bien connu des corps amorphes, les $Si0_4$ composants les verres sont désorientés les uns par rapport aux autres (fig.4) dans un solide ils seraient répartis régulièrement (fig.).

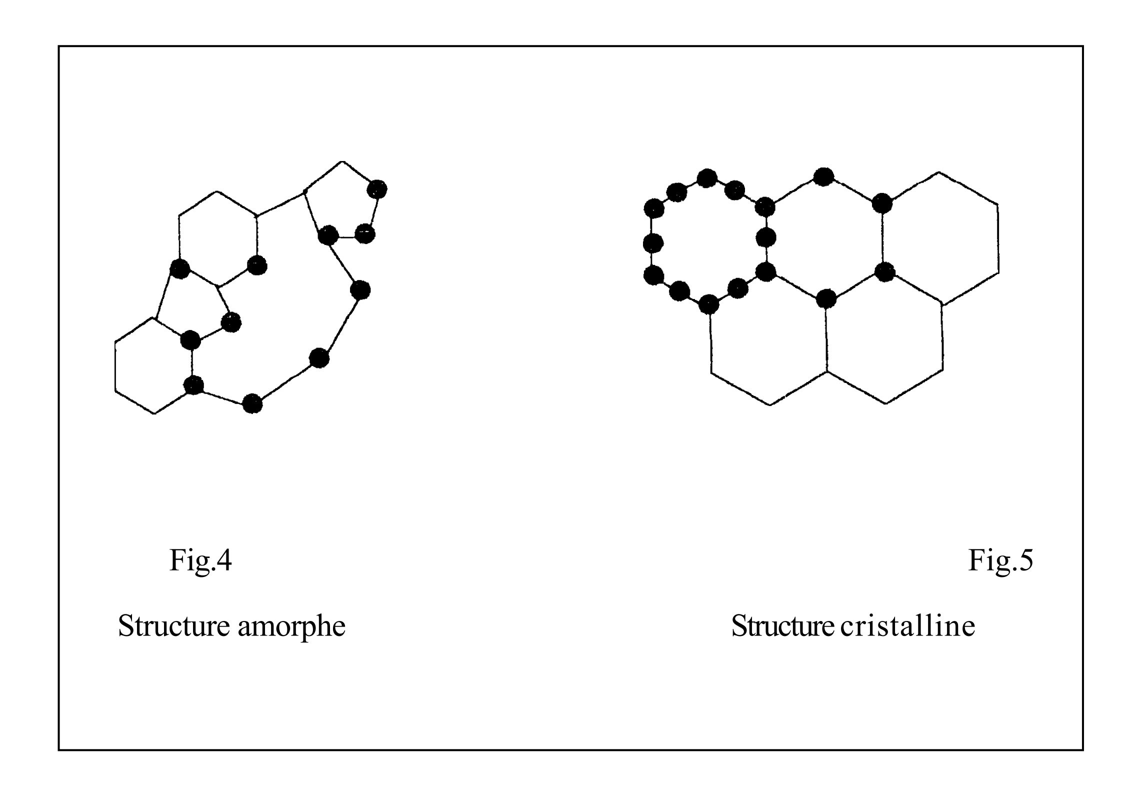


Fig.4

Structure amorphe

Fig.5

Structure cristalline

Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont étés élaborées à partir de matériaux amorphes.

Dans le même ordre d'idée, les liquides ne sont pas tous amorphes. Certains d'entre eux présentent une organisation périodique et les molécules s'orientent les unes par rapport aux autres au sein du liquide. C'est le cas des cristaux liquides dont les propriétés optiques dépendent étroitement des perturbations extérieures (température, pression, champ électrique ou magnétique). Ils permettent la transformation de signaux de nature diverses en signaux optiques, le cas de la télévision ultraplat s'accrochant au mur.

1.2. Propriétés des corps cristallins

Les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

a) ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions) l'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.

b) Un matériau cristallin peut présenter soit :

- un monocristal (cristal unique) par ex : cristal de quartz, de calate, de diamant etc...
- ou un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).

c) Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels que : F -i- S - A + 2 F: faces, S : sommets, A : arêtes. Les faces sont caractérisées par deux lois :

• Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples. Si on fait intervenir la notion du réseau tridimensionnel la position de tout point du réseau peut être indiquée par des coordonnées par rapport à un système d'axe dont l'origine est placée en un nœud du réseau (fig.6).

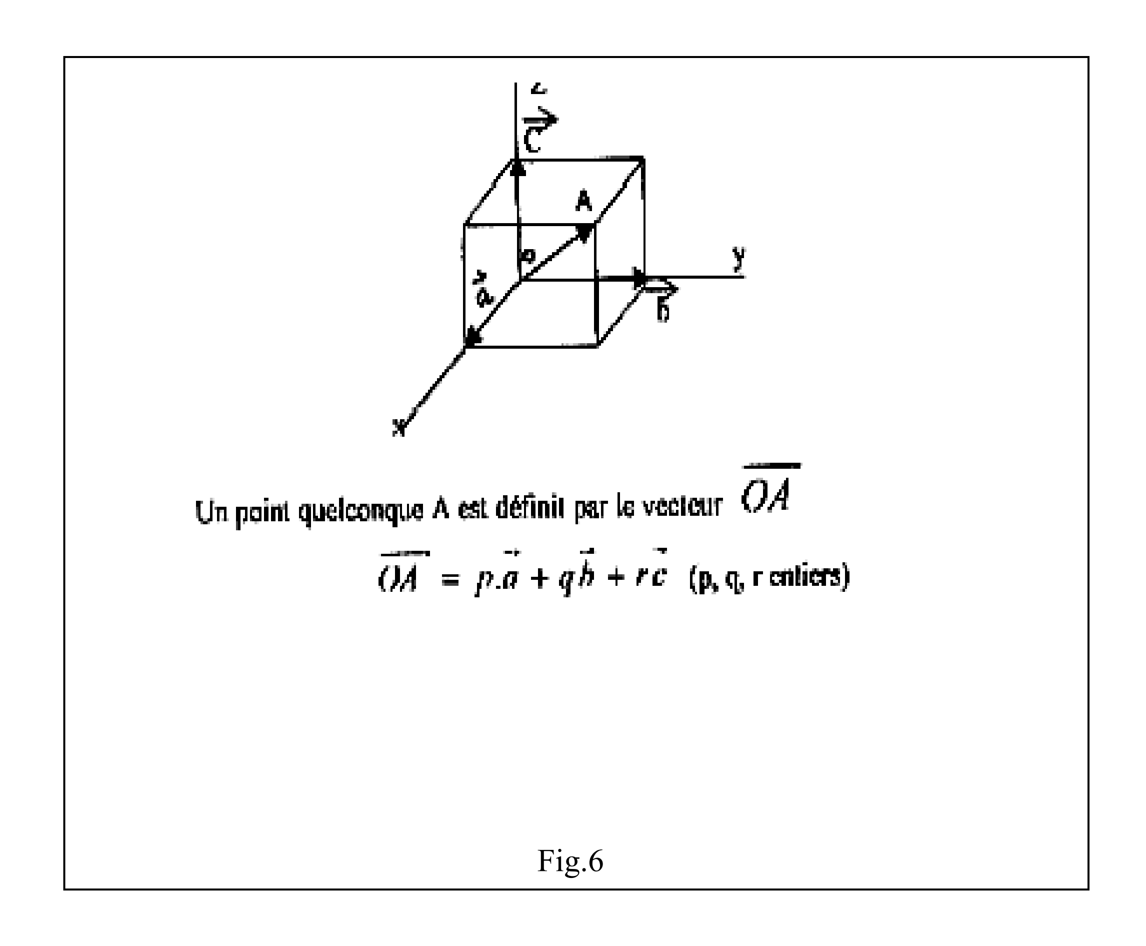
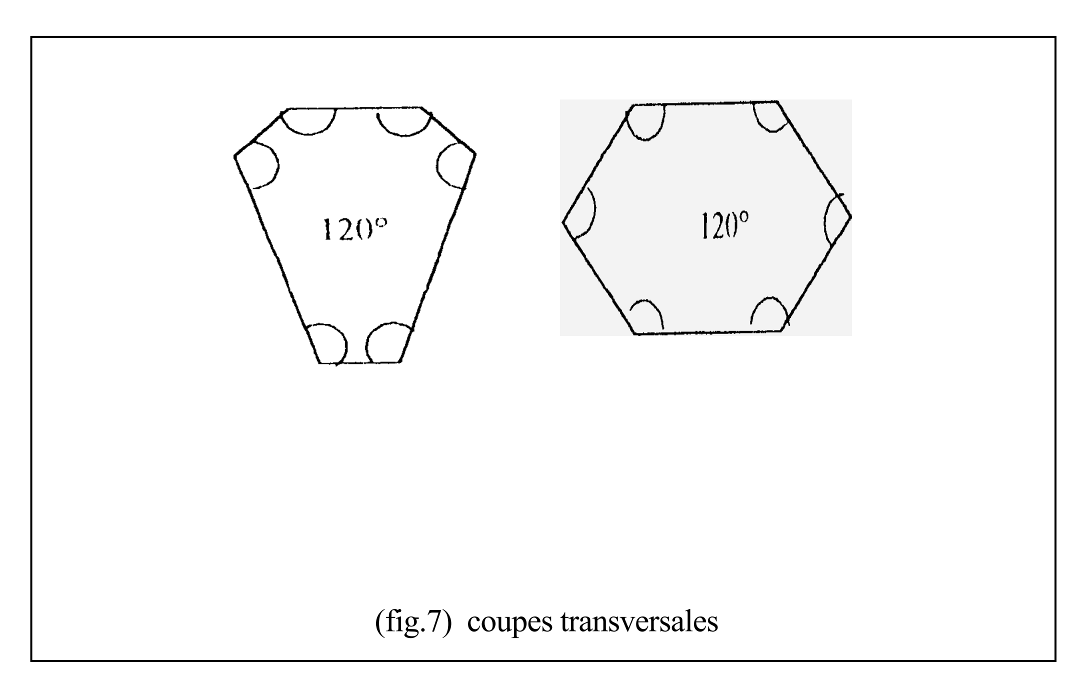


Fig.6

d) Constante des angles dièdres : l'angle formé par deux faces déterminées est constant dans tous les cristaux d'une même espèce chimique. Si nous coupons un cristal de quartz perpendiculairement à l'axe vertical on obtient plusieurs configurations mais avec des angles rigoureusement égaux (120°), (fig.7).



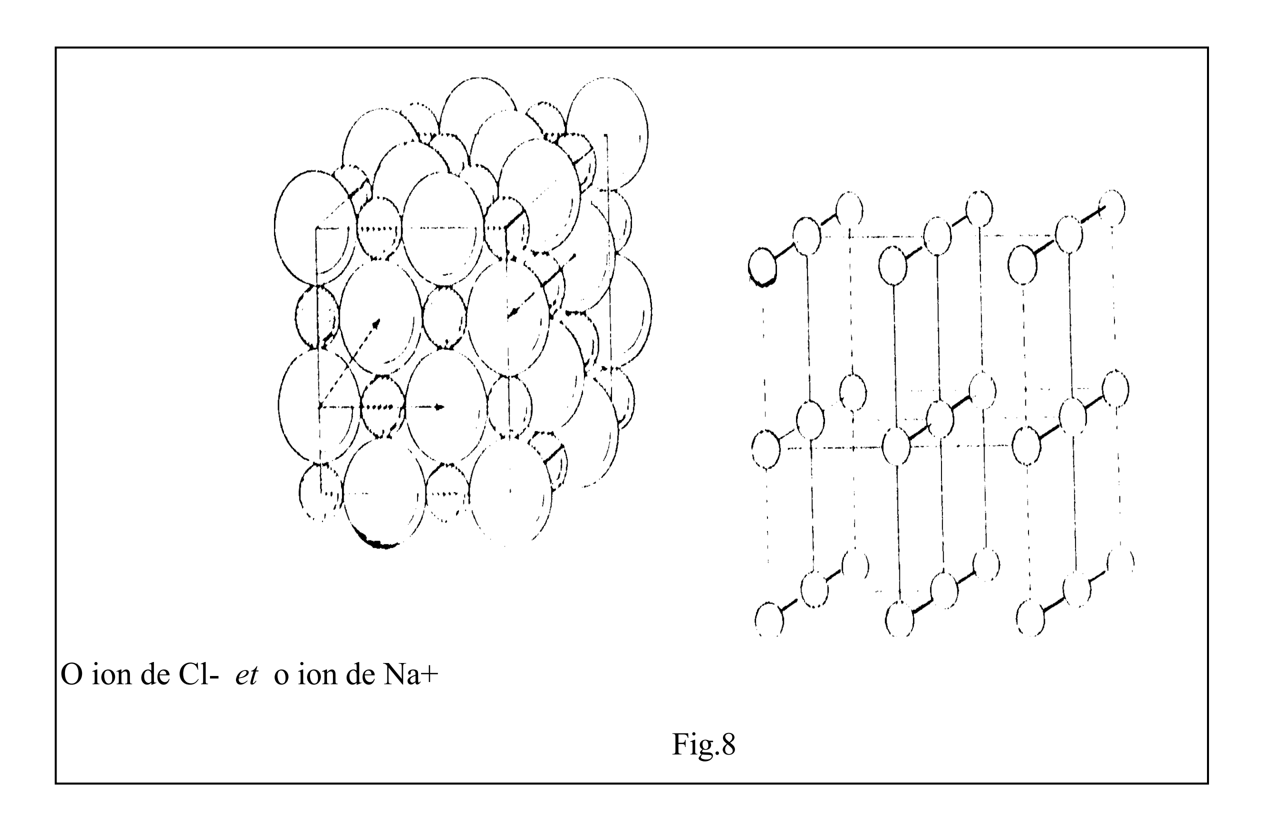
(fig.7) coupes transversales

e) La plupart des cristaux se comportent d'une façon inattendue par rapport à la lumière. Les rayons lumineux se propagent à des vitesses différentes dans les milieux cristallins.

f) Les propriétés d'un cristal peuvent avoir la même valeur dans plusieurs directions et l'on décèle suivant ces directions une symétrie de diverses natures.

1.3. Structure réticulaire

Pour expliquer les particularités observées dans les cristaux on doit admettre que tout corps cristallin a une structure ordonnée réticulaire qui est indépendante de la nature et de la forme des particules matérielles élémentaires constituant le cristal. Donc pour représenter schématiquement une structure cristalline on emploie un réseau à trois dimensions (fig.8), l'exemple du réseau de NaCl.



O ion de Cl^- *et* o ion de Na^+

Fig.8

Un réseau cristallin est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour nœud les atomes (sommet des parallélépipèdes) les droites passant par ces nœuds sont appelé rangés. Tous les nœuds sont groupés dans des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires, la distance entre deux plans voisins de la même famille est la distance interréticulaire.

Tous les parallélépipèdes qui ont pour sommets les nœuds sont appelés maille du réseau c-a-d le volume minimal d'un cristal qui permet déjuger de la structure atomique du volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire (fig. 10) :

Réseau cristallin + motif = structure cristalline

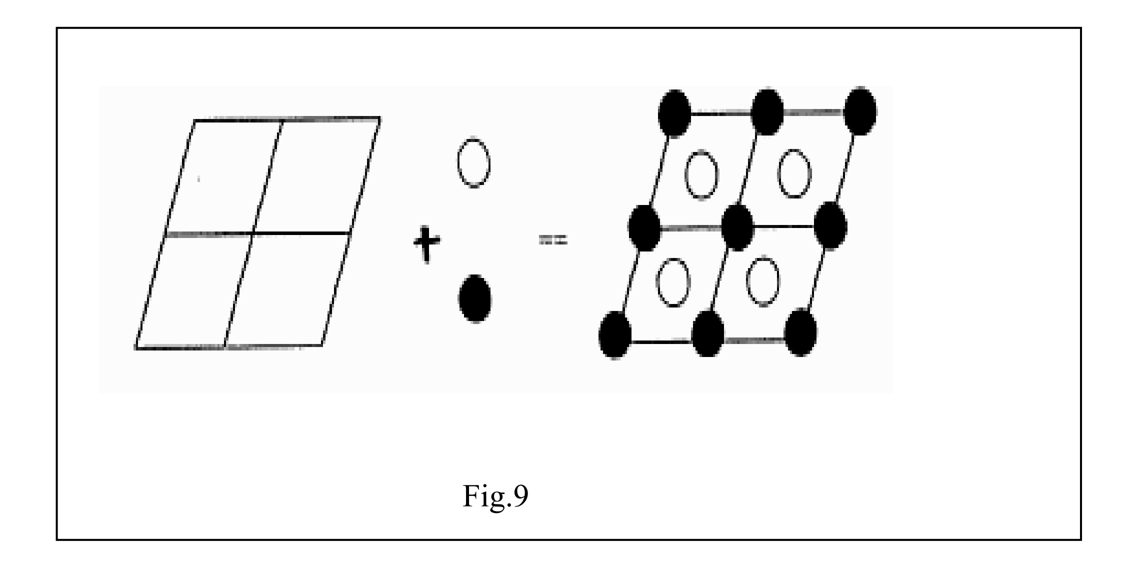


Fig.9

- **La maille élémentaire** : c'est aussi le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini.

- **Motif :** c'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal, l'ensemble régulier de motifs est appelé réseau.

- contrairement au motif le nœud n'a pas de réalité physique.
- La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés, c'est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.

- **Maille du réseau :** Le réseau est théoriquement infini, ainsi pour le décrire, on choisit une unité structurale qui le reproduit par translation. Cette unité c'est la maille élémentaire. On distingue la maille simple ou primitive et la maille multiple.

a) Maille simple ou primitive

Dont les sommets sont constitués de huit nœuds tous voisins quelque soit la rangée considérée, elle ne contient de nœuds ni dans son volume, ni sur ses faces, ni sur ses arêtes. On désigne la maille primitive par la lettre P, il y a autant de maille P que de nœuds dans le réseau, en effet chaque nœud est commun à huit mailles P et chaque maille P correspond à huit nœuds. A chaque maille on peut donc associer un nœud.

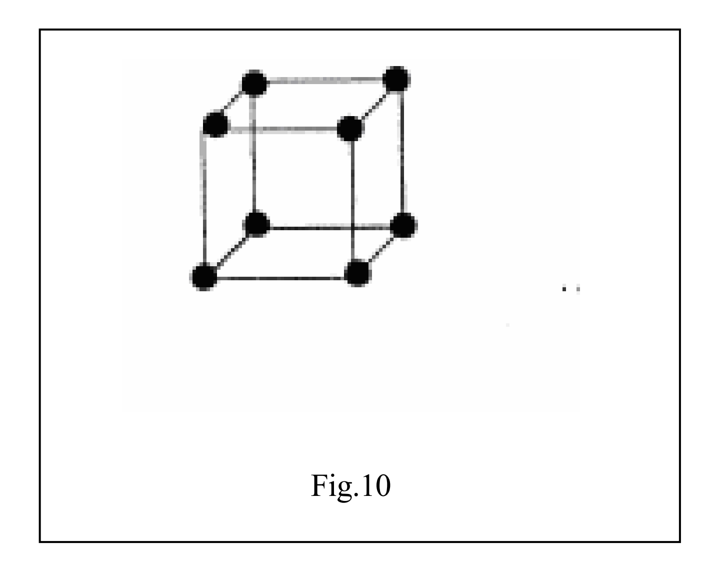


Fig.10

Si chaque nœud est commun à 8 mailles P donc cette dernière contient : 1 / 8 x 8 = 1 atome

Pour toute maille élémentaire :

- Les nœuds à l'intérieur des mailles comptent pour 1.
- Les nœuds aux sommets des mailles comptent pour 1/8.
- Les nœuds sur les arêtes des mailles comptent pour 1/4.

Les nœuds sur une face de maille comptent pour 1/2.

La figure 11 ci-dessous nous montre une coupe schématique d'une maille cubique à faces centrées montrant la proportion 1/8 au niveau de chaque sommet et la proportion 1/2 pour chacun des atomes situés sur les faces.

.

Fig.11

b) Mailles multiples

Dans la catégorie des mailles multiples en plus des huit sommets du parallélépipède, elles contiennent des nœuds dans le volume ou sur les faces, d'où on distingue :

Maille multiple centrée

Elle est désigné par l'abréviation I elle contient des nœuds aux sommets et un nœud au centre du parallélépipède, c'est une maille double.

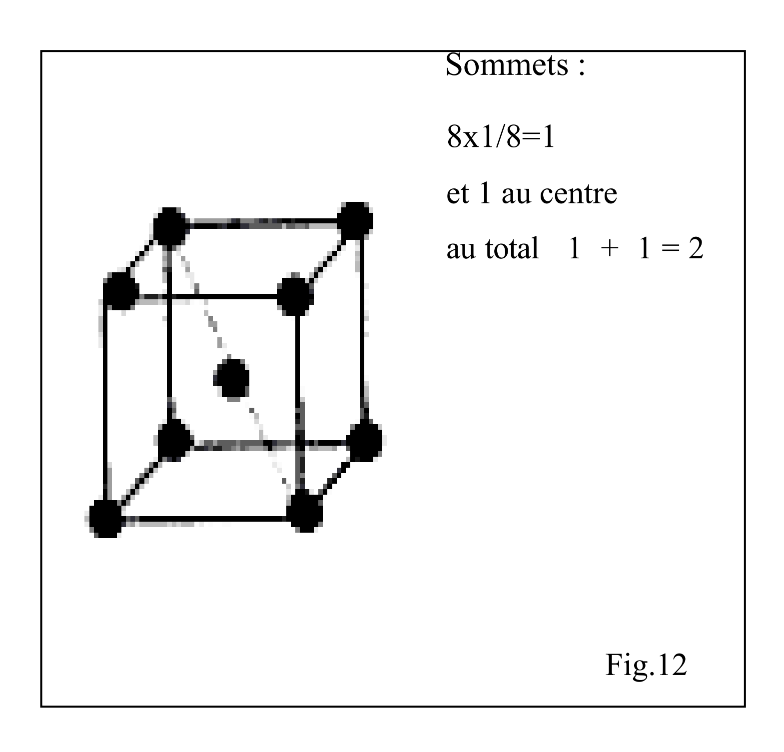


Fig.12

Maille multiple à faces centrées

Désignée par la lettre F, et contient huit nœuds aux sommets et six aux centres des faces c'est une maille quadruple.

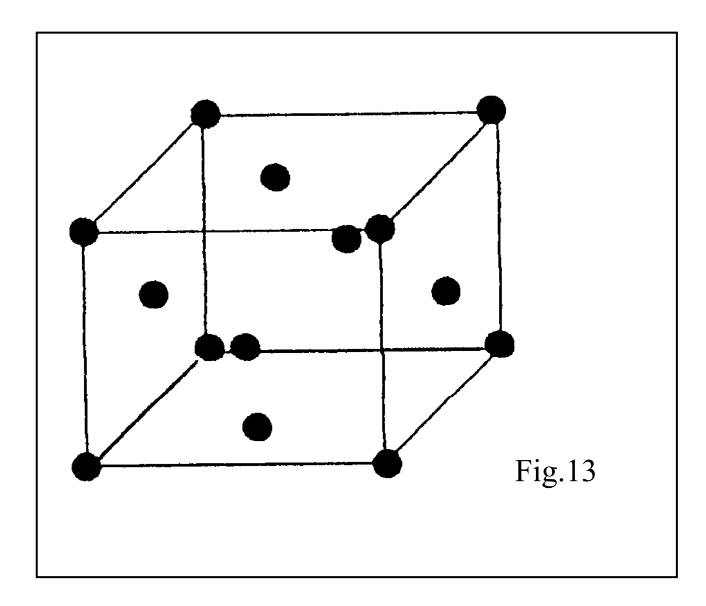


Fig.13

8x1/8 + 6 x !/$_2$ = 4 nœuds au total, les nœuds des faces comptent pour '/$_2$

Mailles multiples à bases centrées

Elle contient des nœuds aux sommets et sur l'une des espèces de bases A, B ou C.

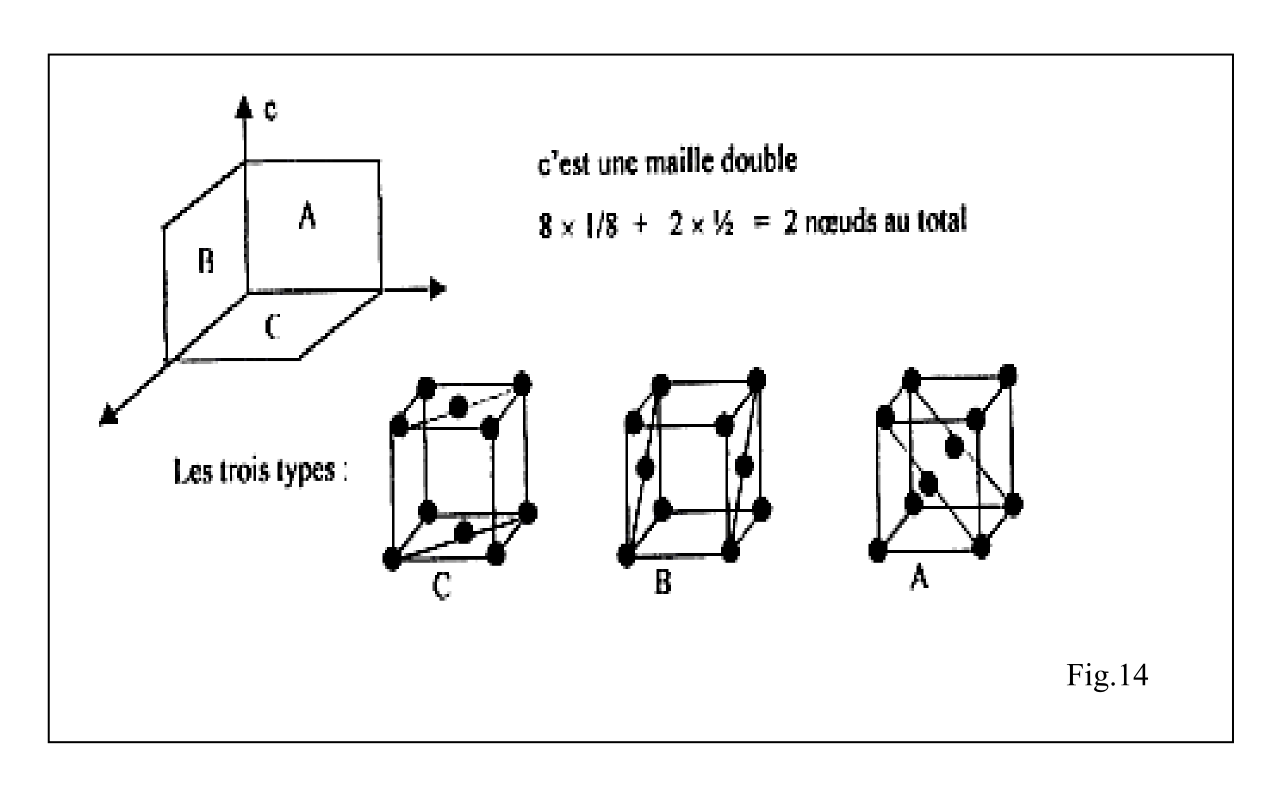


Fig.14

1.4. Systèmes cristallins (les 14 réseaux de Bravais)

A partir de la maille cristalline élémentaire on peut décrire de façon simple les systèmes cristallins existant dans la nature. En combinant les différentes relations entre les paramètres a, b, c et les angles a, P, y du trièdre de référence (paramètres angulaire), Bravais a déterminé 14 réseaux tridimensionnels fondamentaux. Ils sont de quatre modes différents (multiplicité).

- Réseaux simples ou primitifs P.
- Réseaux à bases centrées A, B ou C selon le type de faces centrées.
- Réseaux centrés I.
- Réseaux à faces centrées F.

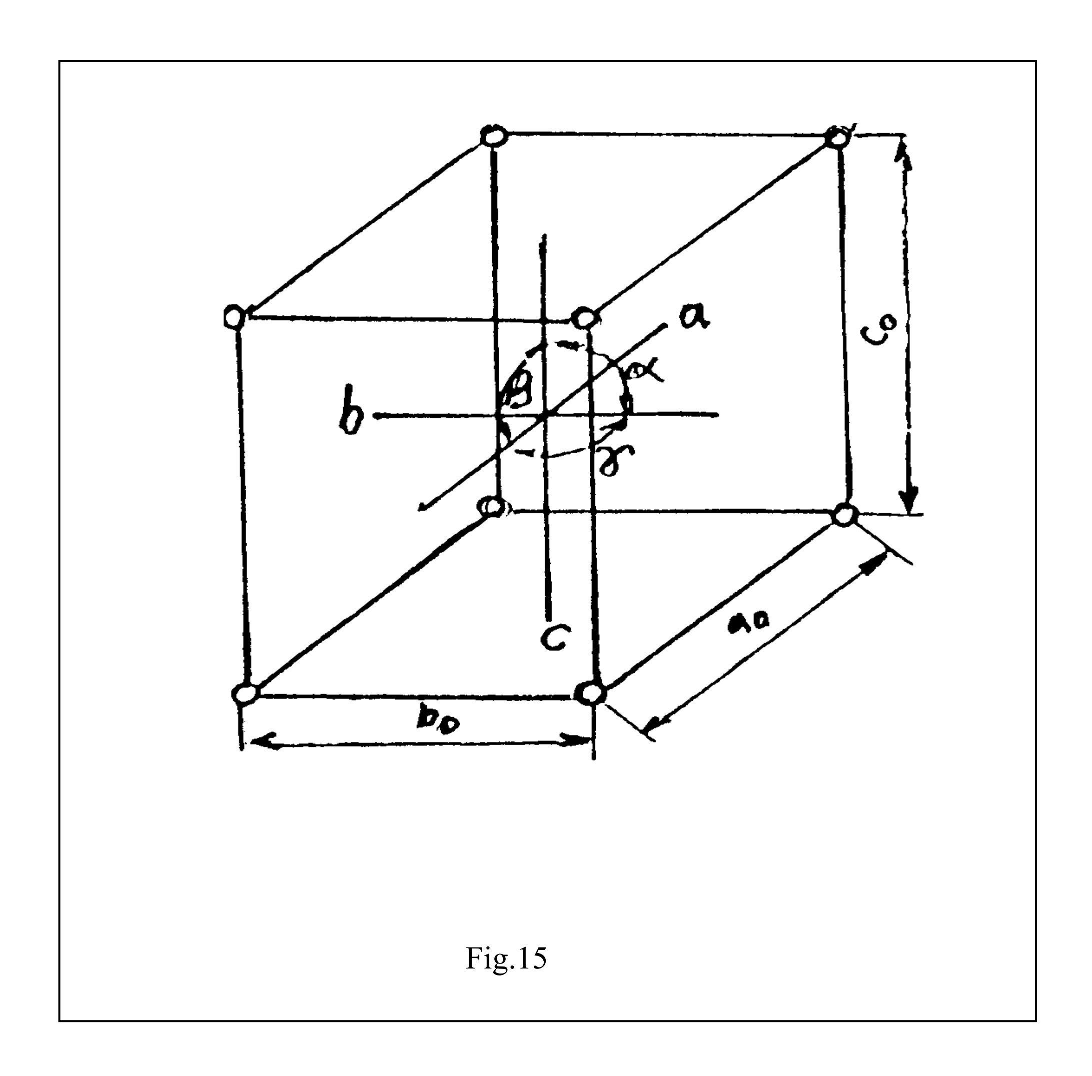


Fig.15

Les sept systèmes cristallins qui existent et qui forment les réseaux de Bravais sont (fig.16):

A : Système triclinique : Le cristal fondamental est un parallélépipède oblique. Il n'admet qu'un seul centre de symétrie à l'intersection des diagonales. 11 possède donc :

- 1 centre de symétrie.
- a # b #c
- α # β # γ *(*#90°, inégaux, mais voisins de 90°).
- 1 seul mode qui est le primitif

B: Système monoclinique : Le cristal fondamental est un prisme droit sur une base rhombique (en losange) incliné dans une seule direction. Il admet :

- 1 centre de symétrie.
- 1 seul axe de symétrie.
- a # b #c
- α =β = 90°
- γ =90°

. 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et à bases centrées (C).

C : Système orthorhombique : La forme géométrique est un prisme droit à base rectangulaire. Il possède :

- 3 axes d'ordre 2
- 1 seul axe de symétrie
- (a = b) # c
- α = β = γ = 90°
- 4 réseaux de bravais : primitif (P), à bases centrées (C), centré (I), et à faces centrées (F).
- **D: Système quadratique: Le** cristal fondamental est un prisme droit a base carrée. il admet :
- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 2 : dont deux sont orthogonaux entre eux.
- (a = b) # c
- α = β = γ = 90°
- 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et centré **(I).**

E : système cubique : La forme fondamentale est un cube. Il a :

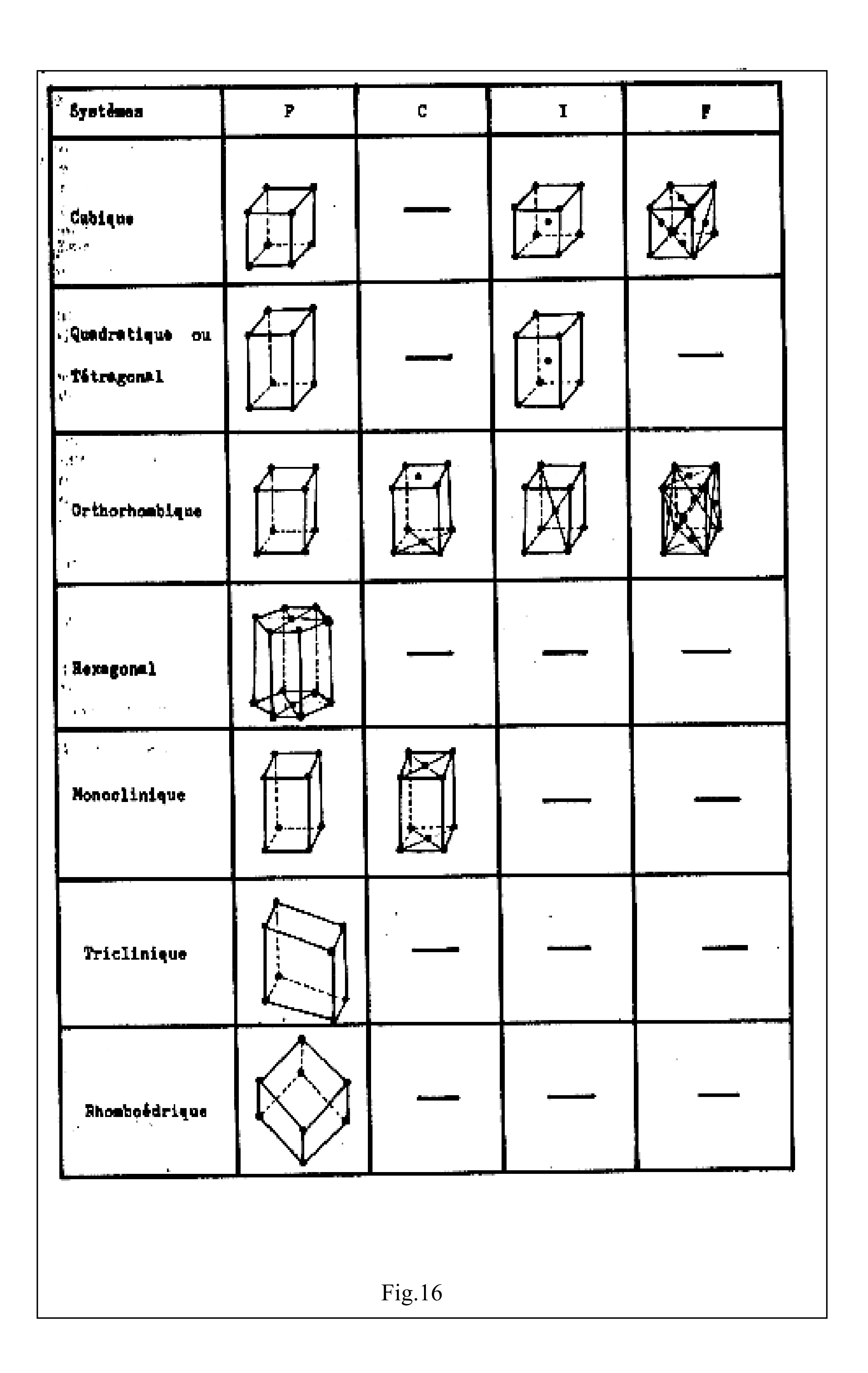
- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 3
- 6 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
- 3 réseaux de Bravais : primitif (P), centré (I), et à faces centrées (F)

F : Système rhomboédrique : la géométrie fondamentale est limitée par 6 losange égaux. Il admet :

- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 3
- 3 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $\alpha = \beta = \gamma$ # 90°
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (P).

G : Système hexagonal : le cristal est un prisme droit à base hexagonale. Il a :

- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 6
- 6 axes d'ordre 2
- $(a = b)$ # c
- $\alpha = \beta = 90°$, $\gamma = 120°$
- 1 seul réseau de Bravais : (P).



Systèmes	P	C	I	F
Cubique		—		
Quadratique ou Tétragonal		—		—
Orthorhombique				
Hexagonal		—	—	—
Monoclinique			—	—
Triclinique		—	—	—
Rhomboédrique		—	—	—

Fig.16

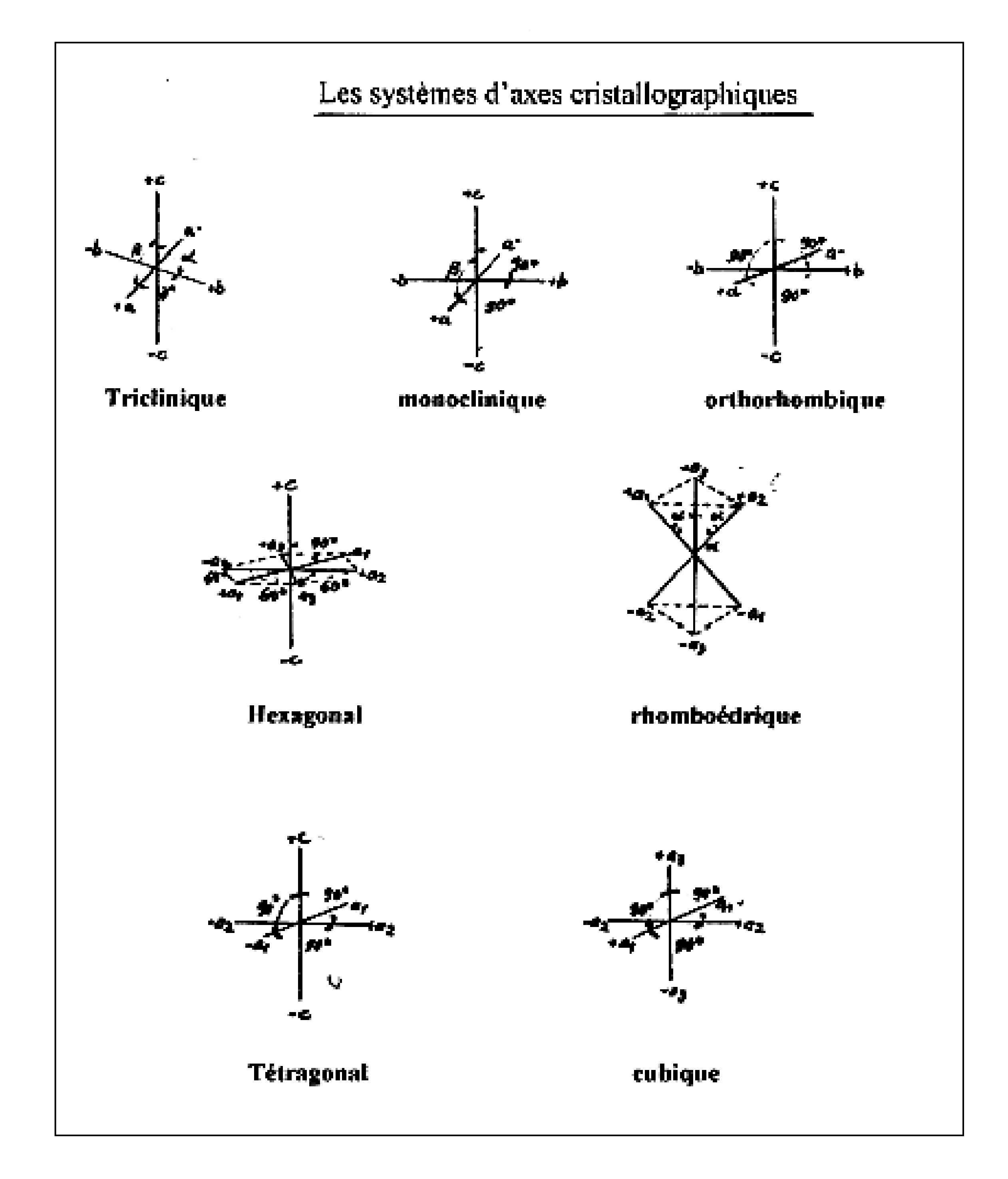

Les systèmes d'axes cristallographiques
Triclinique
monoclinique
orthorhombique
Hexagonal
rhomboédrique
Tétragonal
cubique

Fig.17

Le réseau de la majorité des métaux utilisés dans l'industrie s'établit d'après un des systèmes suivant à symétrie élevée et à empilement compact des atomes : cubique centré, cubique à faces centrées et hexagonal.

Les métaux qui ont le réseau

Cubique centrée :

Rb, K, Na, Tiβ, TL_{β}, Zr_{β}, Ta, W, V, Feα, Cr, Nb, Ba, etc..

Cubique à faces centrées :

Caa, Ce, Sra , Th, Pb, Se, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir, Feγ, Cu, Co_{α} etc..

Hexagonal

Hfα, Mg, Tiα, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Coβ, Be, Caα, V, Laα, TLα, Zrα etc..

Un réseau hexagonal est composé d'atomes placés aux sommets et au centre des bases hexagonales du prisme, trois atomes se trouvent dans le plan médian du prisme, donc il compte 17 atomes.

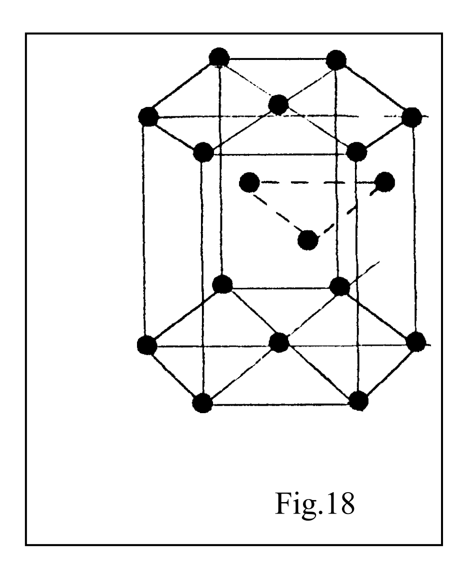


Fig.18

Le réseau hexagonal ne contient pas d'atomes au plan médian. La maille élémentaire d'un réseau hexagonal compte 6 atomes :

$12 \times 1/6 + ½ \times 2 + 3 = 6$ atomes

1.5 Densité du réseau

La densité du réseau cristallin c-a-d le volume occupé par les atomes qu'on peut considérer comme des sphères suffisamment rigides est caractérisée par l'indice de coordination ou coordinence, terme qui indique le nombre d'atomes situés à une distance égale et minimale de l'atome considéré, plus la

coordinence est grande, plus l'empilement des atomes est compact. La distance minimale entre les atomes d'une maille élémentaire cubique correspond à **a√3/2**, c'est la distance qui sépare l'atome considéré de ses 8 voisins, on en déduit que la coordinence de ce réseau est égale à 8 (C8) et le coefficient d'empilement (rapport du volume occupé par les atomes au volume de la maille) vaut ≈ 68%.

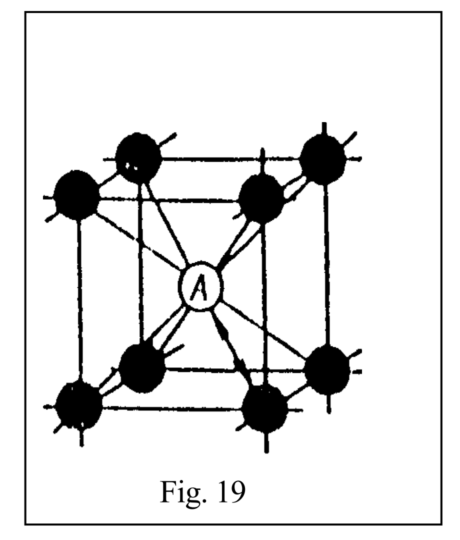


Fig. 19

Pour une maille cubique à faces centrées, la coordinence est égale à 12 (Cl2), chaque atome comptant 12 voisins situés à une distance minimale *d*= **a√3/2,** ce qui correspond à la compacité maximale de l'empilement sous forme de sphères.

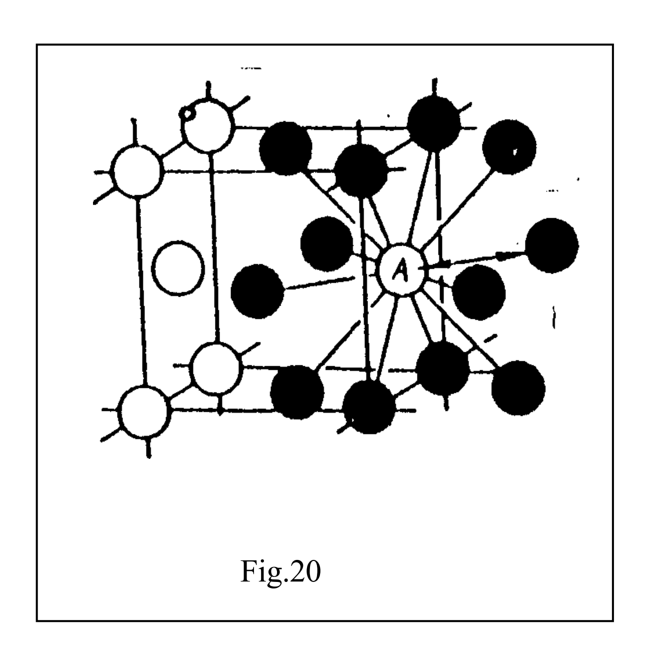


Fig.20

L'indice de coordinence du réseau hexagonal compact dont le rapport C/a = 1,633 est 12(H12) ce qui correspond également à une densité maximale. Lorsque la valeur de C/a se distingue nettement de 1,63 (cas du zinc et du cadmium) la coordinence du réseau hexagonal est égale à 6.

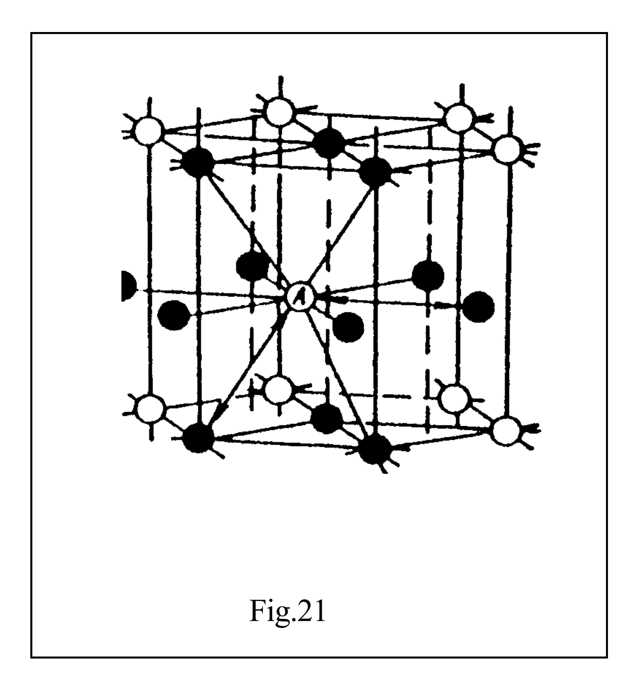


Fig.21

1.6. Notions des plans ou faces cristallographiques

On peut déterminer la position dans l'espace de chaque face cristallographique au moyen de trois nombres entiers. Pour cela on prend comme axes de coordonnées trois arêtes de la maille élémentaire et comme unité de longueur les modules de trois vecteurs de base de la maille Z.

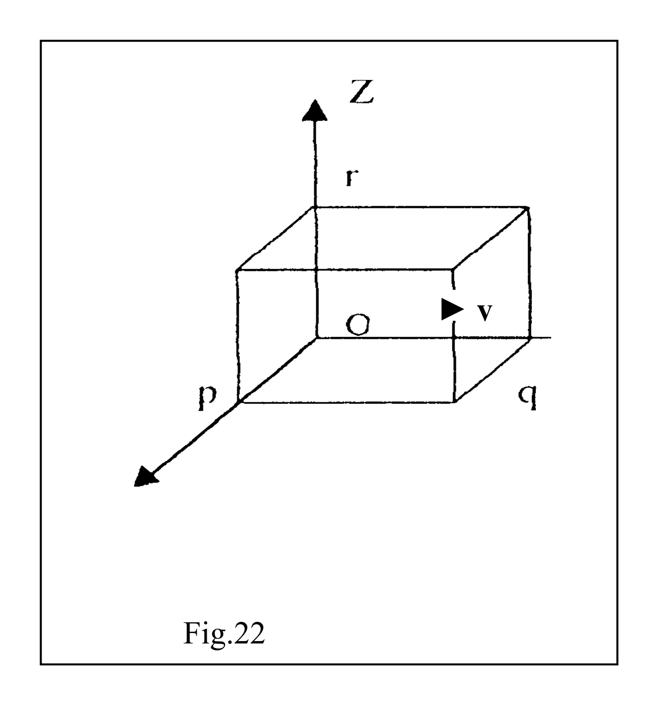


Fig.22

En 1838 Weis proposa une méthode qui consiste après avoir défini le trièdre de référence à déterminer dans l'espace l'orientation de chaque face cristalline à l'aide de trois caractéristiques numériques p, q, et r. On peut repérer les faces du prises dans le système d'axes de coordonnées ox, oy et oz par a1 b1 c1 et a_2 b3 c_6 (fig.23). La face a1 b1 C1 intercepte une seule équidistance sur chacun des axes ox oy oz (fig.23).

Oa1, Ob1 et Oc1 où le rapport p :q :r = 1 :1 :1

a_2 b3 c_6 ou le rapport p :q :r = 2 :3 :6

L'ensemble de ces trois nombres (1,1,1) pour la première face et (2,3,6) pour la deuxième face sont les indices de Weiss des deux faces.

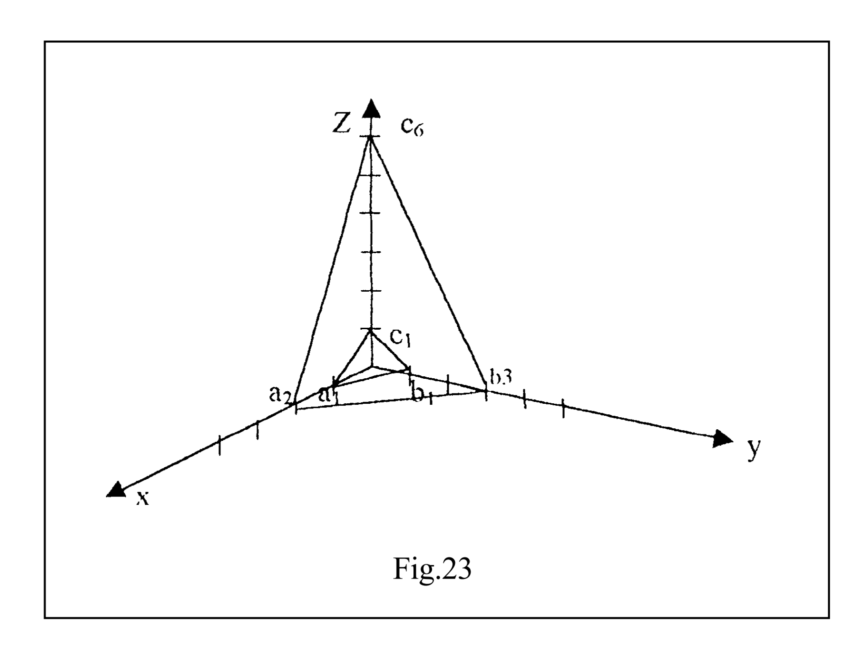


Fig.23

En 1839 Miller proposa une méthode beaucoup plus commande qui est actuellement d'un emploi universel; il a remplacé les caractéristiques numériques de Weiss p, q, r par leur inverse 1/p, I/q, 1/r, en général on obtient 3 fractions inférieures à l'unité et dont les rapports réciproques sont exprimés par trois nombres entier premiers ente eux appelés indice de Miller et notés **(hkl) :**

h=1/p , k=l/q , l=1/r

Donc les indices de Weiss sont (2, 3, 6) et ceux de Miller hkl = (1/2, 1/3, 1/6)

Remarques :

a) Les indices de faces ou de plans sont toujours mis entre parenthèses sans séparation.

b) Un indice négatif par exemple (-h) est désigné par *(h)*, (-2)-> (2).

c) Un plan parallèle à un axe le coupe à l'infini, son indice de Miller (valeur réciproque)

correspond à cet axes est 1/QO = 0.

d) Une famille de plans (h k 1) est désignée par une accolade *{hkl}* .

Exemple de notation pour les plans d'un cube (fig.24)

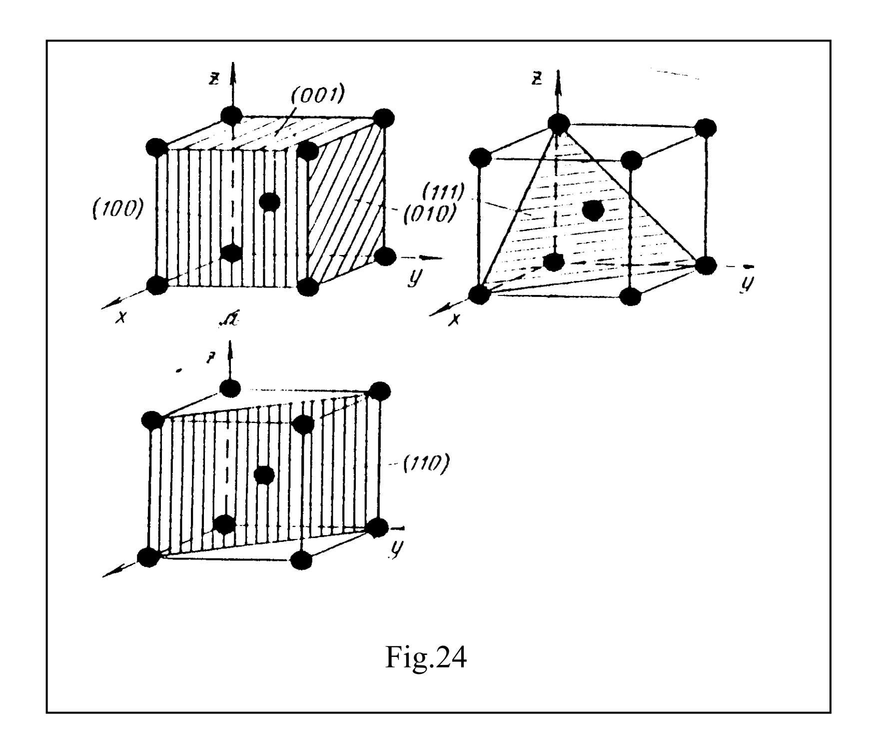


Fig.24

Chaque plan du cube ne coupe qu'un seul axe, les segments étant égaux.

Pour les faces avant, droite, supérieure ont respectivement (1, ∞, ∞) ; (∞, 1, ∞); (∞, ∞,1) les valeurs inversement proportionnelles aux segments tranchés sont respectivement 1,0,0 ; 0,1,0 ; 0,0,1 mais il est d'usage de mettre les indices des plans h k 1 entre parenthèses et de ne pas les séparer par des virgules (1 0 0), (0 1 0), (0 0 1) pour les faces arrières, gauche et inférieure ont respectivement (100), (010), (001). Le réseau cubique, en plus des plans de cube compte des plans octaédriques (fig.24) (111) et des plans décadrhombique (fig.24) (1 1 0).

1.7. Indices de directions

On entend par direction cristallographique, la ligne droite qui joint au minimum 2 nœuds. Pour déterminer les indices de direction dans un système d'axes de coordonnées, on choisit la ligne parallèle à la direction et qui passe par l'origine. Pour la suite on détermine les coordonnées du nœud le plus proche, les nombres ainsi déterminés sont appelés indices cristallographiques de direction et sont notés [uvw]. Les droites de direction sont toujours perpendiculaires aux plans qui ont leurs mêmes indices (fig.25)

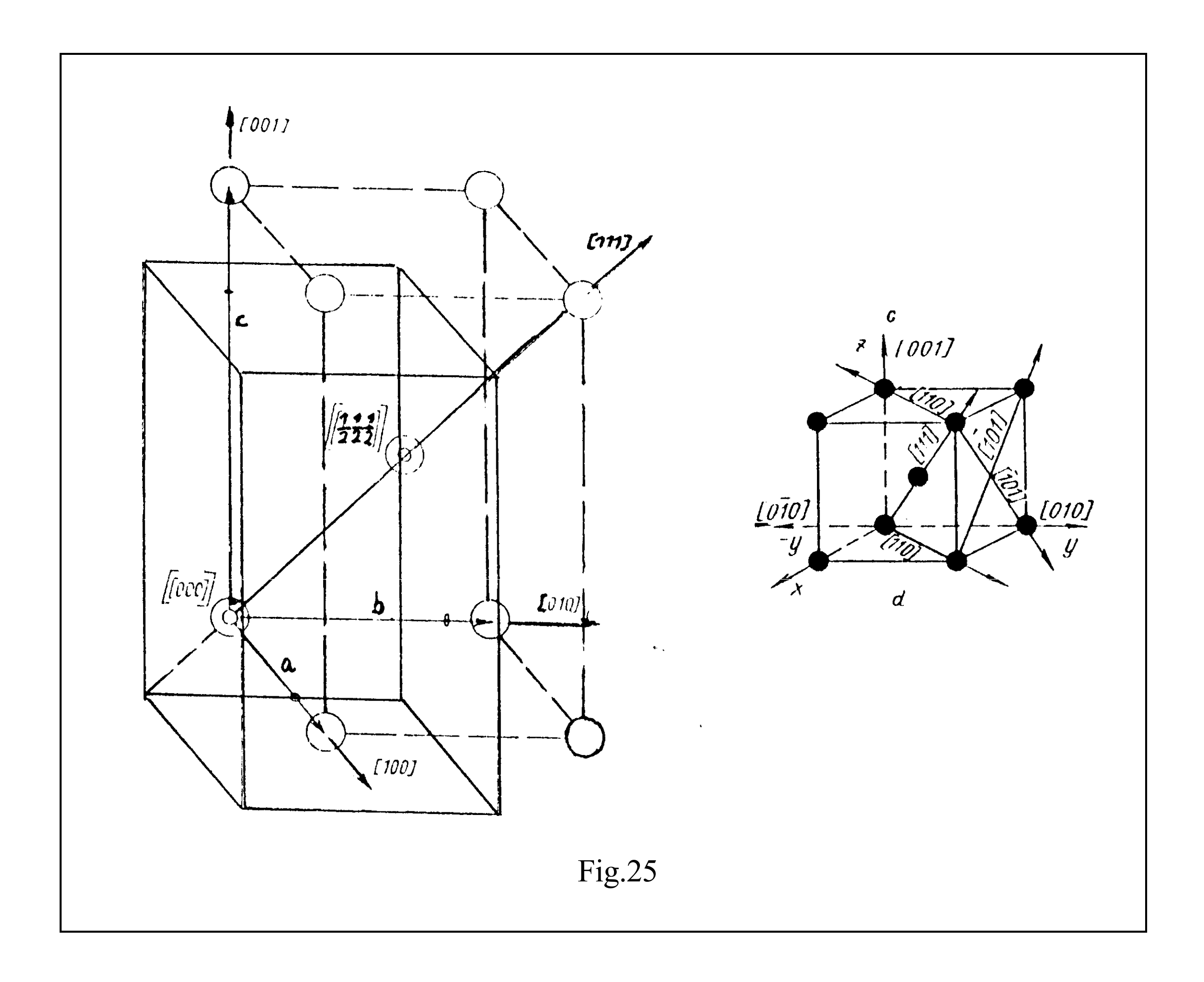


Fig.25

Exemples avec solutions

Exemple 1 : Donner les définitions des termes suivants, relatifs à un cristal cubique parfait : Face, arête, sommet, axe diagonal, axe principal

Réponse 1 :

- Face —► surface plane extérieure délimitant le cristal.
- Arête —► ligne d'intersection de deux faces continues.
- Sommet —► point sur lequel se joignant 3 faces contiguës du cube.
- axe diagonal ou secondaire -► droite joignant deux sommets diamétralement opposés.
- Axe principal —► droite joignant le centre de deux faces apposées.

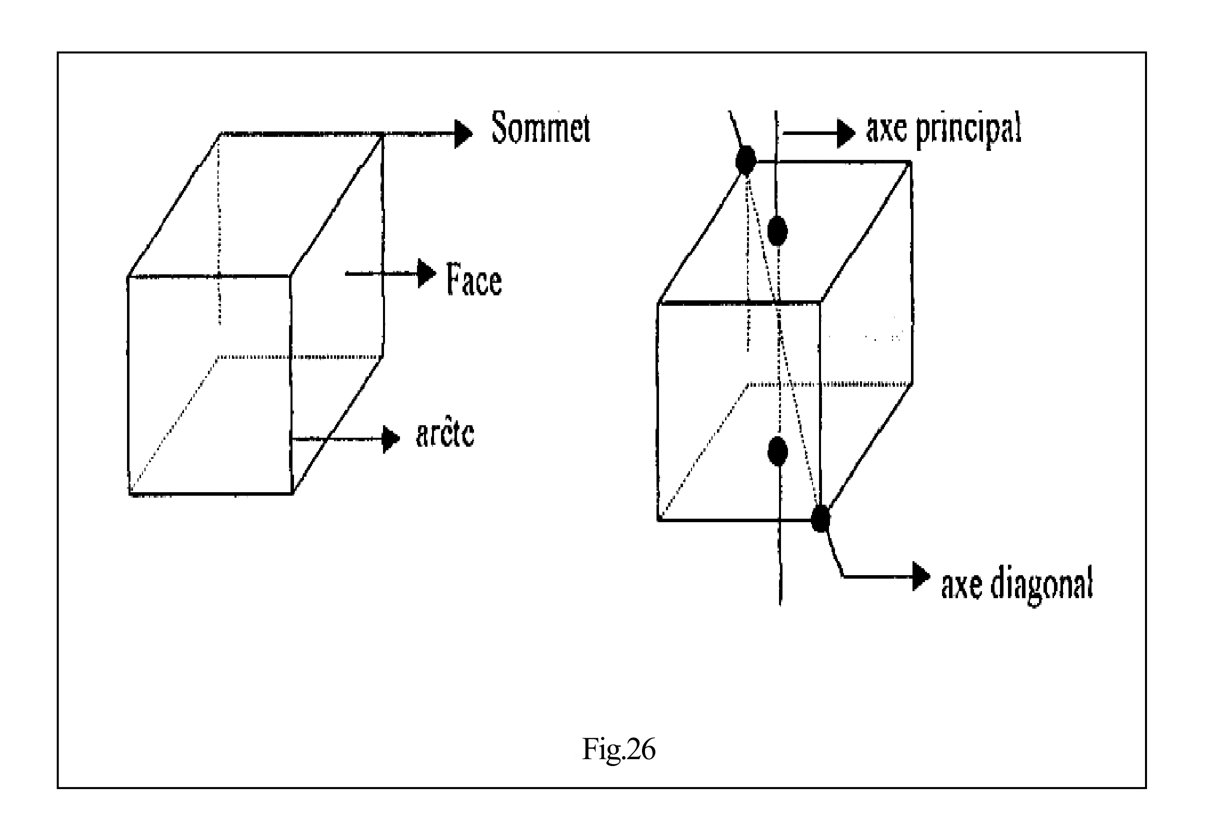


Fig.26

Donc on a :

6 faces, 12 arêtes, 8 sommets, 3 axes principaux et 6axes diagonaux.

Exemple 2 : dans le système d'axes de coordonnées suivant, indexer les faces ABC et EFG, en appliquant la règle de Miller.

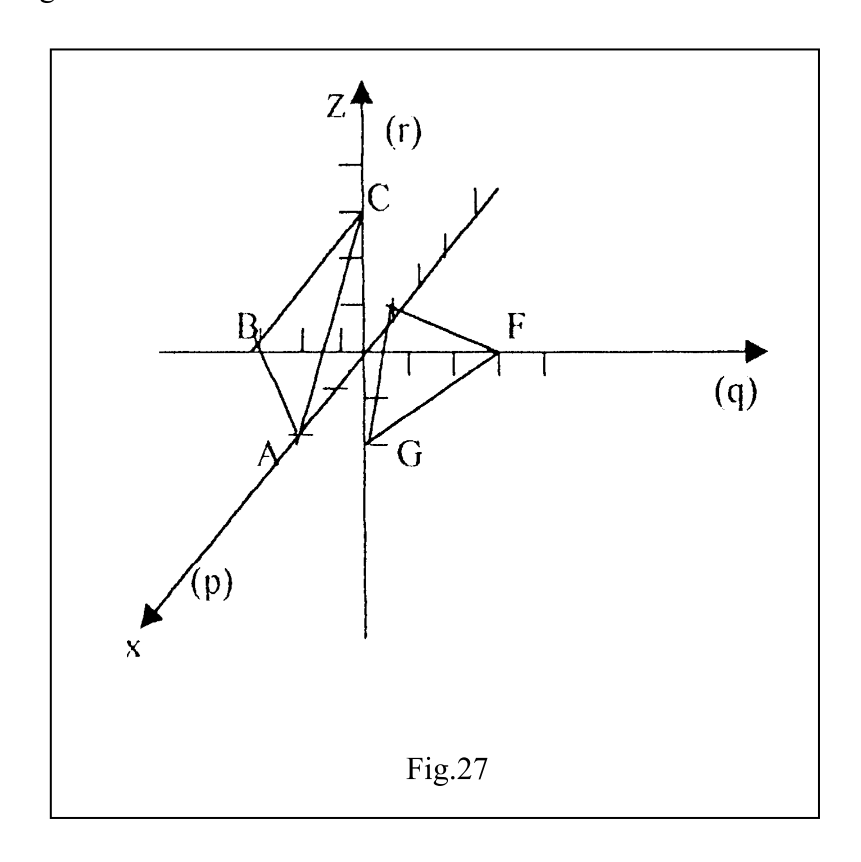


Fig.27

Réponse 2 : les indices de Miller sont hkl qui remplacent les caractéristiques numériques de Weiss p q r : h = 1/p k = 1/q 1 = 1/r

Donc on obtient trois fonctions inférieures à l'unité et dont les rapports réciproques sont exprimés par trois nombres entiers premiers :

Face ABC : p = + 2 q = - 3 r = + 3

(hkl) = (1/p 1/q 1/r) = (1/2,-1/3, 1/3)

hkl = (1/2-1/3 l/3).6= (3 2 2)

Face EFG : p = - 1 q = + 3 r = - 2

(1/p, 1/q, 1/r) = (-1,1/3,-1/2)

hkl -(-1 m-U2).6= (6 2 3)

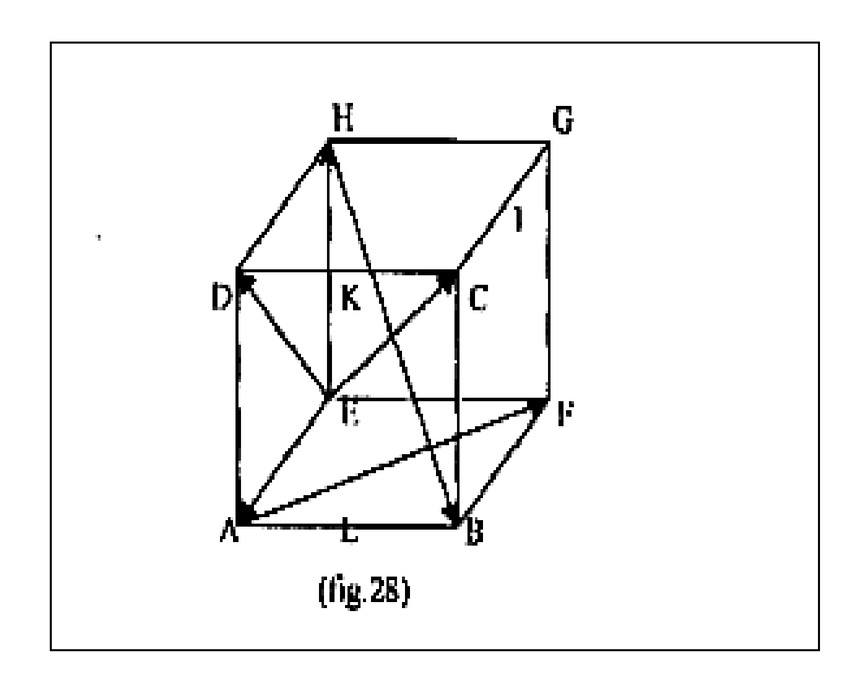
Exemple 3 : dans le système cubique suivant :

a) Indexer les 6 faces du cube.

b) Indexer les faces AEGC, EDG, AFGDI

c) Identifier les faces (100), (1 10), (110), (101)

d) Indiquer les directions [l l0], [1 1 l], [010], [101]



(fig.28)

Réponse 3 :

a) les six faces du cube : AEFB = (100), DCGH = *(100),* BFGH = (010), AEHD ABCD = (001), EFGH = (001).

(p q r) = (1, ∞, ∞) => (hkl) = [1/p, 1/q, 1/r] = [1/1, 1/∞, 1/∞]

b) les faces AEGC, EDG, AFGD :

AEGC = (110), EDG = (1, 1, 1) AFGD = (011)

c) (100) = AEBF, (110)= AEGC, (110)=FBDH, (l0l) = ABGH

d) [l 10]= HF [l 11] = *HB* [010]= HG [101]= HA

Exemple 4

a) indexer les directions schématisées par les flèches.

b) indexer les plans HGFE, HUE, HCBE, HKLE, HDAE.

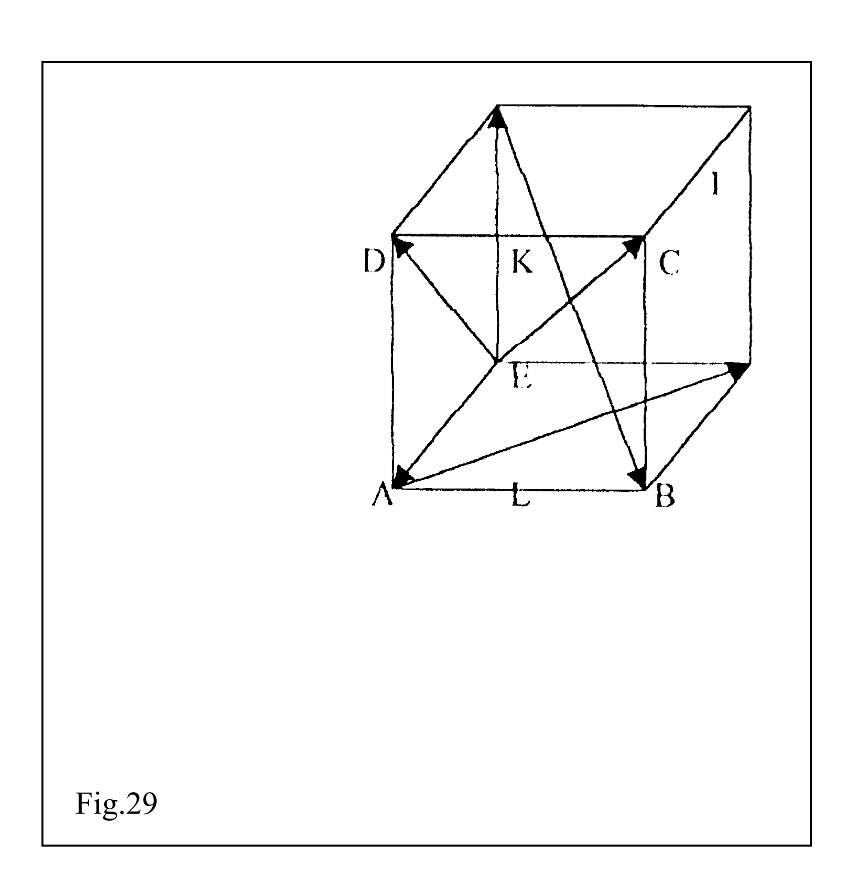


Fig.29

Réponse 4

EA[100] ,ED[101], HE[001] , EC[111], HB[111] , AF[110] , EF[010]

Les plans :

HGFE = (100), *HIJE* = (1/2 10),),

Exemple 5 :

Indexer les 8 faces d'une maille hexagonale élémentaire.

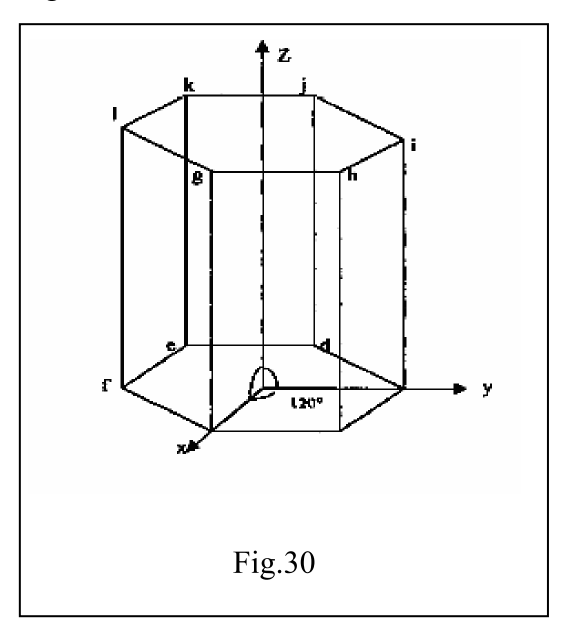


Fig.30

Réponse 5

Faces latérales

abhg = (1010)

bcih= (0110)

cdji = (1100), edjk = (1010) *fekl = (0110)*

afig= (1100)

Bases

abcdefa = (0001), ghijklg= (0001)

Exemple 6

Soit une maille cristalline cubique à faces centrées ayant une arête a = 4 déterminer :

a) le nombre d'atomes par unité de surface dans le plan (110) et (111).

b) La densité d'atomes par unité de longueur suivant les directions [110] et [111**]**.

c) **Réponse 6**

Maille CFC avec les plans (110) et (111)

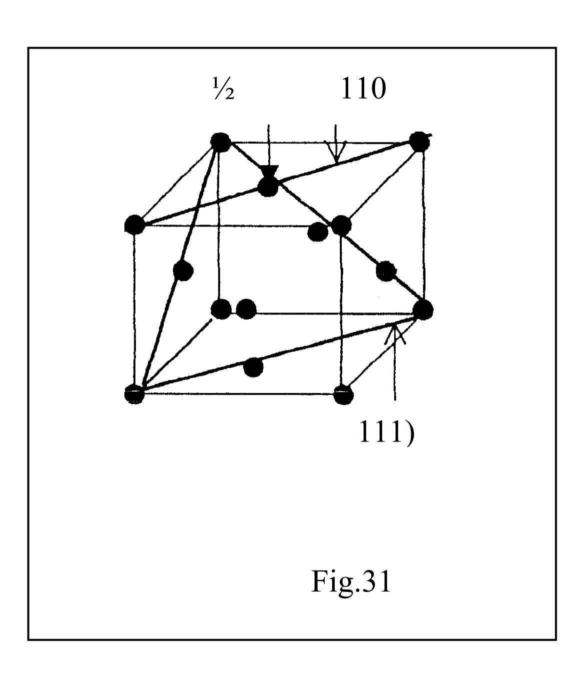


Fig.31

a) Nombred'atomesparunitédesurface

plan (1 10)

Nombred'atomescentredesfaces:2.(1/2)=1]

=2

Nombre d'atomes sommets : 4.(1/4) = 1]

Surface du plan $a.\sqrt{a^2 + a^2} = a^2\sqrt{2}$

d'où le nombre d'atomes par unité de surface

$N1=2 / a^2\sqrt{2}= 89000$ *atomes /cm2*

plan (111)

Nombre d'atomes des faces : 3. (1/2) = 3/2

= 2

Nombre d'atomes sommets : 3. (1/6) = 1/3

surface du plan a. $a^2(\sqrt{3}/2)$ car surface du triangle $\frac{b \times h}{2}$

a. $\sqrt{2}$ h a. $\sqrt{2}$

a. $\frac{\sqrt{2}}{2}$ a. $\frac{\sqrt{2}}{2}$

d'où le nombre d'atomes par unité de surface :

$$N_2 = \frac{2}{a^2.\sqrt{3}/2} = 1{,}4.10^{15} \ atomes/cm^2$$

b) la densité linéaire

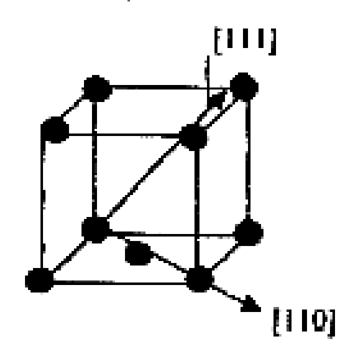


Fig.32

La direction [110]

Longueur du vecteur : r = $\sqrt{a^2 + a^2} /2 = a\sqrt{2}/2$

Densité $d = 1/r$ = 3,54.10^7 *atomes/cm2*

La direction [l 1 l] :

Longueur du vecteur : r = $\sqrt{a^2 + a^2 + a^2} = a\sqrt{3}$

Densité d = 1/r = 1, 44. 10^7 *atomes/cm2*

Exemple 7

Soit le système cubique centré et le système cubique à faces centrées.

a) Indiquer dans chacun des cas, le plan de densité atomique maximale.
b) Indiquer les directions cristallographiques de densité atomique maximale.

Réponse 7

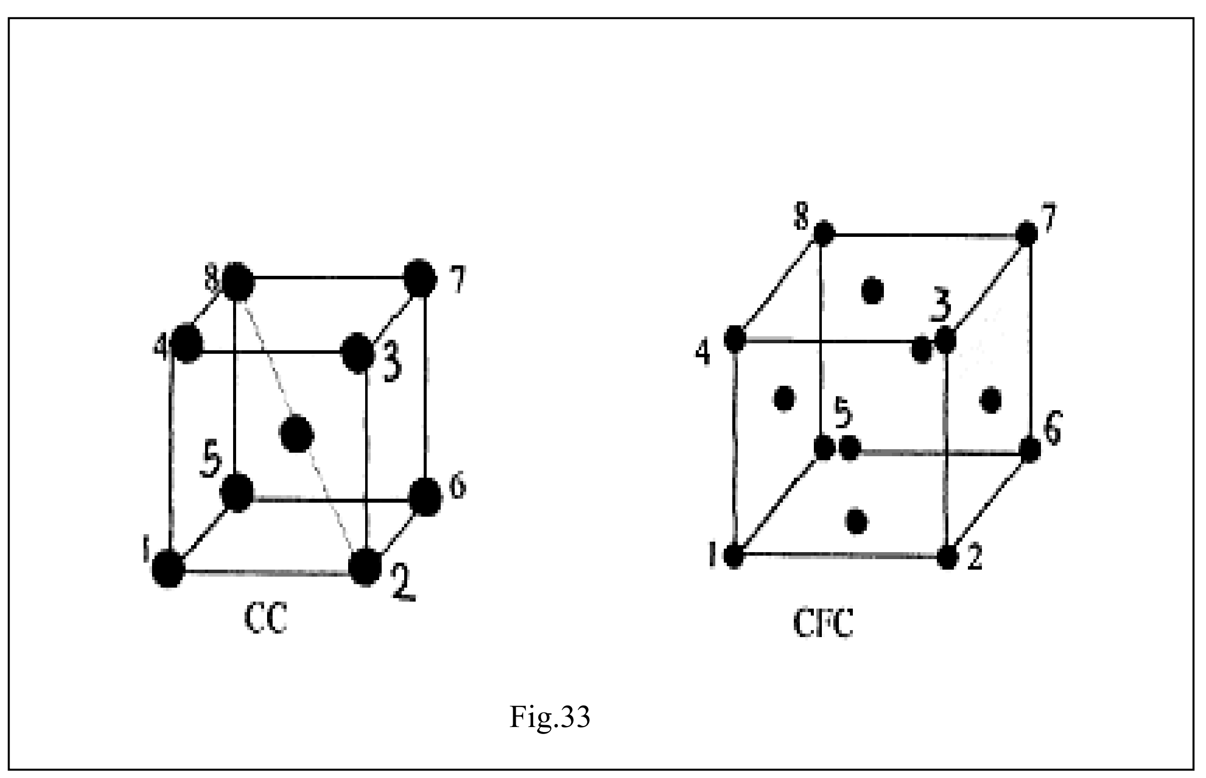


Fig.33

- Système CC et CFC :

a) Plans de densité atomique maximale :

• Système CC : ce sont les plans diagonaux qui passent par l'atome central, et il y a 6:1674 ,2385 ,1278 ,3456 ,3751 ,2684

• Système CFC : ce sont les plans diagonaux de type (111), et il ya 4 :425 ,361 ,752 ,861

b) Directions cristallographiques de densité atomique maximale :

• Système CC : ce sont les direction qui passent par P atonie centrale, et il y a 4 :17 ,28 , 46,35

• Système CFC :ce sont les directions qui passent par les atomes centrés dans les faces et il en a 3 dans le plan (1 1 1) : 16 , 18 , 68

Exemple 8

Déterminer le nombre d'atomes par maille élémentaire des réseaux suivants :

a) cubique simple C.S
b) cubique centré CC
c) cubique à faces centrées C.F.C
d) hexagonal compact

Réponse 8

Nombre d'atomes par maille élémentaire :

• a) Maille cubique simple CS : il y a 8 atomes disposés aux sommets et appartenant chacun à 8 mailles voisines dans la proportion 1/8. Donc la maille cubique simple contient :

8.(1/8)= 1 atome/maille

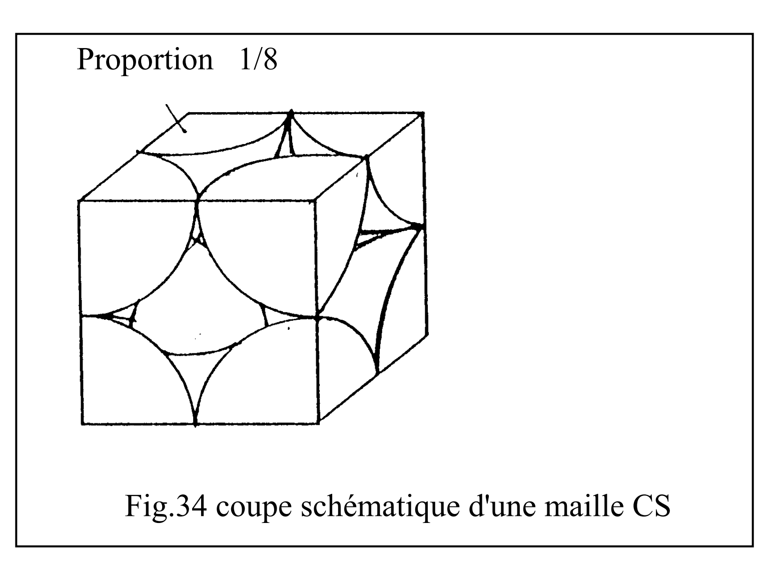


Fig.34 coupe schématique d'une maille CS

• b) Maille cubique centrée CC : dans ce cas, on a la même disposition que dans le cas précédent plus un atome entier placé au centre de la maille. Soit au total :

8.(1/8) + 1 - 2 atomes/maille

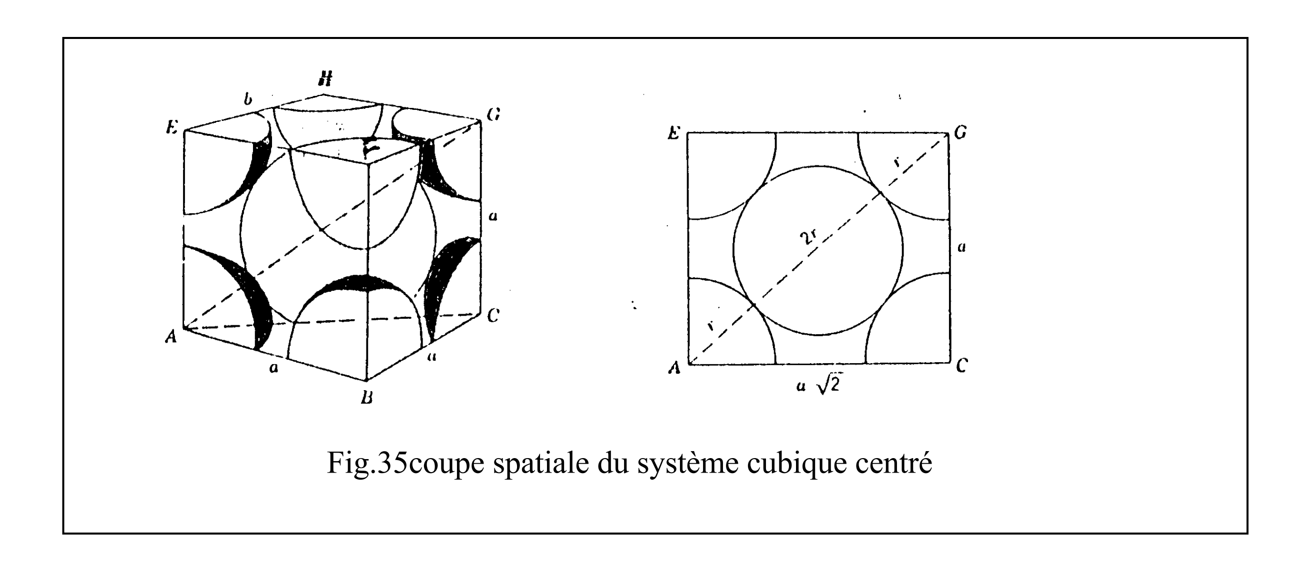


Fig.35coupe spatiale du système cubique centré

c) Maille cubique à faces centrées (voir figure 35): au centre de chaque face est placé un atome dans le rapport V_2, et aux sommets 8 atomes dans le rapport 1/8. Donc au total :

8.(1/8) +6.(1/2) =4 atomes/maille

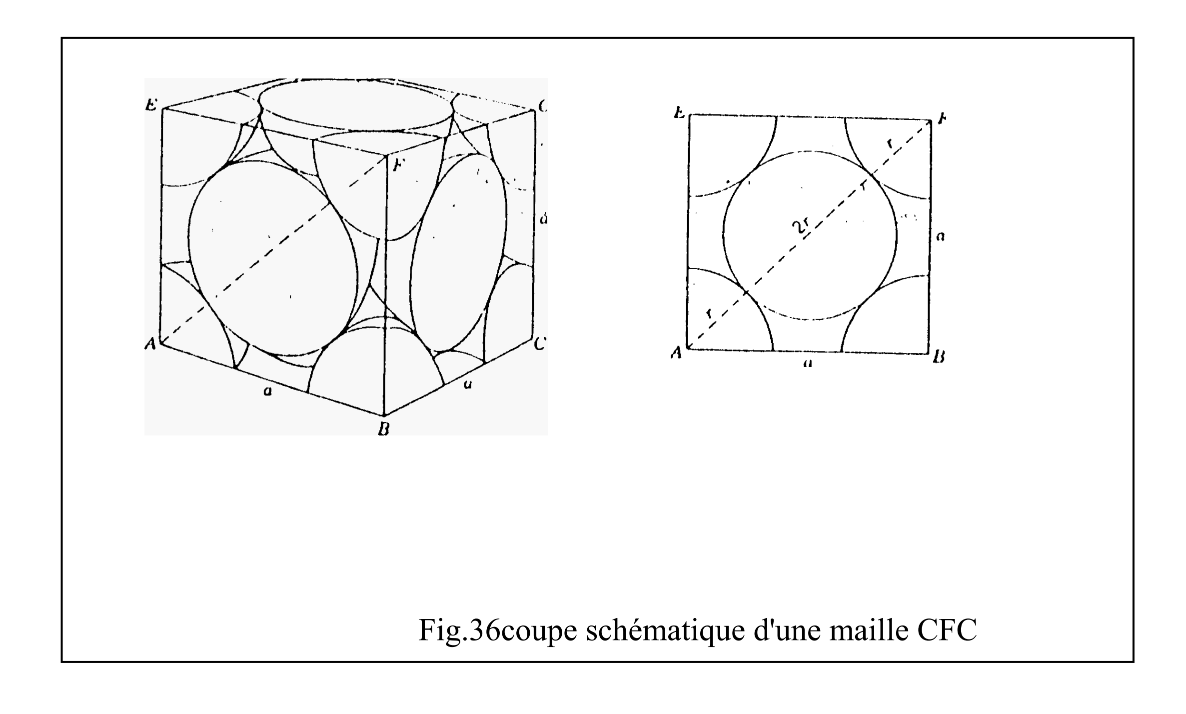


Fig.36coupe schématique d'une maille CFC

d) Maille hexagonale compact HC : comporte 12 atomes disposés aux sommets des deux bases dans la proportion 1/6 chacun, 3 atomes entiers placés à l'intérieur de la maille, et 2 atomes sur les bases. Donc on obtient :

12.(1/6) +3 + 1 =6 atomes/maille

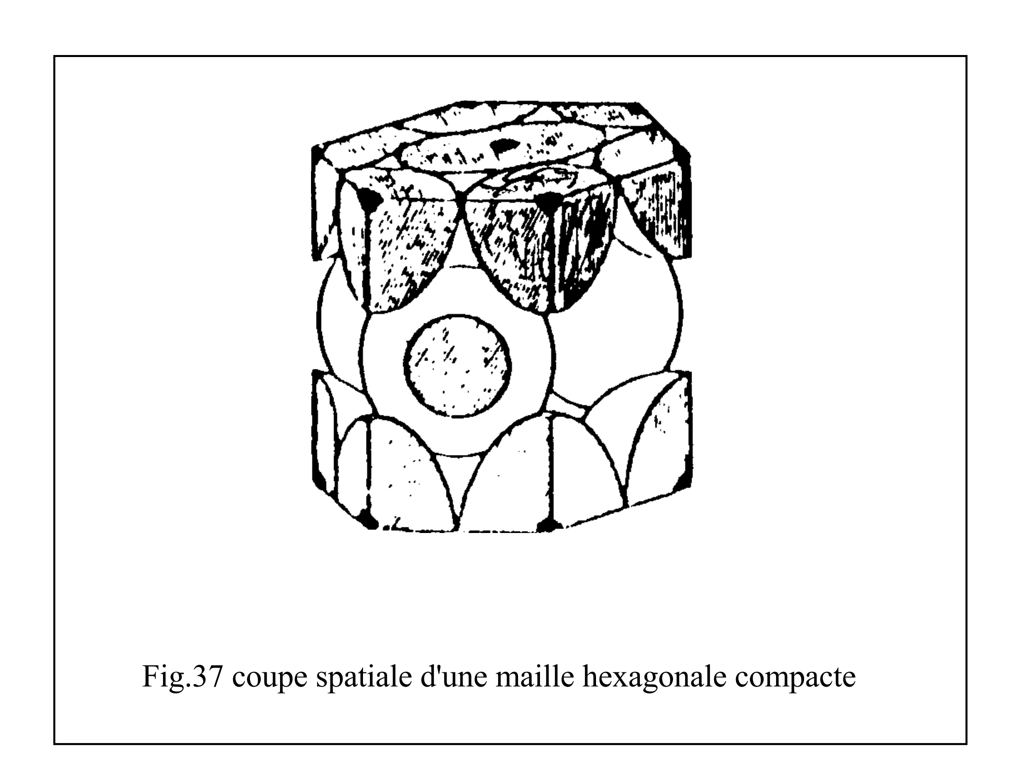


Fig.37 coupe spatiale d'une maille hexagonale compacte

Exemple 9

Quelle est la densité (compacité) du réseau cristallin d'une maille cubique simple sous les conditions que l'atome à pour rayon r.

Réponse 9

La densité du réseau est le volume occupé par les atomes qu'on peut considérer comme des sphères suffisamment rigides.

D : densité

N : nombre d'atomes par maille

V_A : volume de l'atome

Vmaille: volume de la maille

Pour une maille primitive simple le nombre d'atome est 8.1/8 = I atome

$\mathbf{V_A = 4/3\ \Pi.}r^3$

$\mathbf{V_m} = a^3 = (2.r)^3$ a = 2.r longueur de l'arête

$\mathbf{D} = NVa/Vm = 1.\ 4/3\ \Pi.r^3 / (2.r)^3 = \Pi/6 = 0{,}523$

La maille cubique simple est remplie avec 52,3% d'atomes. La même méthode peut être appliquée pour déterminer la densité dans le cas des réseaux CC, CFC et HC.

2. Etablissement des diagrammes d’équilibre

Les diagrammes d’équilibre représentent l’état physique et l’état des phases d'un alliage en dépendance de la composition chimique et de la température. La majorité des diagrammes d’équilibre connus, sont valables pour une pression d’un atmosphère et sont déterminés grâce aux courbes de refroidissement. Ces diagrammes sous une forme graphique,, commode, indiquent la composition des phases et la structure de l'alliage en fonction de la température et de la concentration. Les diagrammes d’équilibre sont construits à partir des conditions d’équilibre ou des conditions assez proches de celles-ci. Leur détermination, se basant sur la mesure des propriétés qui varient en fonction des transformations de phases, tels que les variations de longueurs, la susceptibilité magnétique, la résistance électrique, l’enthalpie et autres grandeurs en dépendance de la température.

Un état d’équilibre correspond à la valeur minimale de l'énergie libre. Dans les conditions d’équilibre, à la température et à la pression données, l’énergie libre d’un système ne doit pas changer, c’est à dire, le travail des forces internes doit être nul. L'état d’équilibre des alliages est dit également stable parce qu’il ne subit pas d’autovariations dans le temps. Cet état ne peut s’obtenir qu’à de très faibles vitesses de refroidissement ou avec un chauffage d’une grande durée.

D’ailleurs, il est rare que pratiquement, on réalise un équilibre réel. Dans la grande majorité des cas, les alliages se trouvent à l’état métastable, c'est à dire, à l'état dans lequel la stabilité des alliages est limitée et les interventions extérieures les font passer à l’autre état plus stable, car l'énergie des alliages est plus grande que leur énergie minimal**e.**

2.1. Phases dans les alliages

Les alliages s’obtiennent, soit par fusion, soit par frittage de deux ou plusieurs éléments. L’addition à un métal pur, d’un ou de plusieurs éléments, métalliques ou non, peut modifier profondément ses propriétés. Les substances qui forment les alliages sont appelées : ‘’composants’’. Selon le nombre de composants, un alliage peut être :

- Binaire (2 composants).
- Ternaire (3 composants).
- Quaternaire (4 composants), etc.

Les phases sont les parties homogènes du système. Elles sont caractérisées par :

- La composition chimique, le type de réseau cristallin et les propriétés résultantes.
- La présence d'une surface de séparation avec les autres parties du système appelée ‘’interface‘’.
- Un changement brusque de composition et de propriétés lors du passage à travers cette interface.

Parmi les phases, on distingue :

- Les solutions solides.
- Les solutions liquides
- Les combinaisons chimiques (type AnBn).

L'état d'équilibre d'un système correspond à la valeur minimale de l'énergie libre G dans les conditions normales d'équilibre (température T, pression P). L'énergie libre doit être constante et le travail des forces internes doit être nul.

$$dG\ (T, P) = 0$$

L'équilibre des alliages est dit ‘’stable’’ lorsqu'il ne subit aucun changement spontané dans le temps. Cet état ne peut s'obtenir qu'à de très faibles vitesses de refroidissement ou de chauffage. D'ailleurs l'état d'équilibre réel est rarement obtenu. Dans la plupart des cas, l'équilibre est ‘’métastable’’ néanmoins son état est proche de l'état stable.

Les métaux à l'état fondu, ont un grand pouvoir dissolvant vis à vis de l'état solide. C'est ainsi par exemple, que le mercure qui est liquide, à la température ambiante peut dissoudre l'or qui ne fond qu'à 1063°C. Après dissolution, le liquide obtenu est plus ou moins homogène, il est appelé ‘’alliage liquide’’.

2.2. Règle des phases ou loi de Gibbs

Quand un corps fond, il y a changement de phase (et de réseau), puisqu'il passe de l'état solide à l'état liquide. La règle des phases établit la relation entre le nombre de degrés de liberté V (variance), le nombre de composants C et le nombre de phases Φ :

$$V = C - \Phi + n$$

La variance désigne le nombre de facteurs d'équilibre indépendants que l'on peut faire varier arbitrairement sans que le nombre et la nature des constituants physico-chimiques varient.

n = nombre de facteurs extérieurs (température, pression).

Si on se limite aux diagramme de phases métalliques, on prend n=1, parce que la pression dans ce cas n'influe pas de manière signifiante sur les points de transformation et l'on obtient alors :

$$V = C - \Phi + 1$$

Comme la variance ne peut être inférieure à zéro, ni à un nombre fractionnaire, on en déduit que :

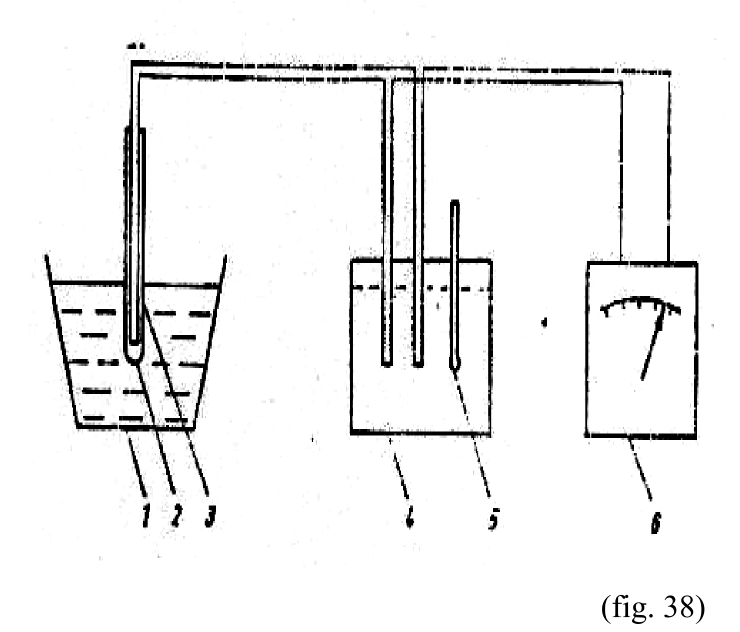
$C - \Phi + 1 > 0$ soit $\Phi < C + 1$

Autrement dit, le nombre de phases d'un alliage en équilibre ne peut dépasser le nombre de composants C + l, cela veut dire qu'un système binaire ne peut avoir plus de trois phases en équilibre, un système ternaire ne peut avoir plus de quatre, etc.

- Lorsque V = 0, le système est dit invariant : la transformation de l'alliage commence et se termine à le même température et à la même composition.
- Lorsque V = 1, le système est dit monovariant.
- Lorsque V = 2, il est dit bivariant, etc.

2.3. Cristallisation des matériaux métalliques

Pour l'étude des transformations de phases il n'est pas exigé d'acquérir la quantité de chaleur exacte en calorie, mais il est suffisant d'arrêter la variation de la température en fonction du temps sous forme de courbes de refroidissement. Cette méthode est introduite par TAMMAN et désignée par l'analyse thermique. Le principe d'une analyse thermique est représenté sur la figure 38.



1. Four de fusion.
2. Verre de protection des thermo-éléments.
3. Thermo-éléments.
4. Thermostat pour maintenir la température constante
5. Thermomètre.
6. Instrument de mesure de la tension thermique.

(fig. 38)

Pour la détermination des lignes de phases dans le diagramme d'équilibre, une série d'alliages, avec différentes compositions du système à étudier, sont fondus et successivement refroidis avec l'enregistrement des courbes de refroidissement correspondantes dans un intervalle de temps déterminé.

Si on refroidi un corps ne subissant aucune transformation, on pose :

- T : température du corps.
- T_0 : température ambiante.
- C : capacité calorifique du corps.

Une faible baisse de température dT correspond au dégagement d'une quantité de chaleur dq telle que :

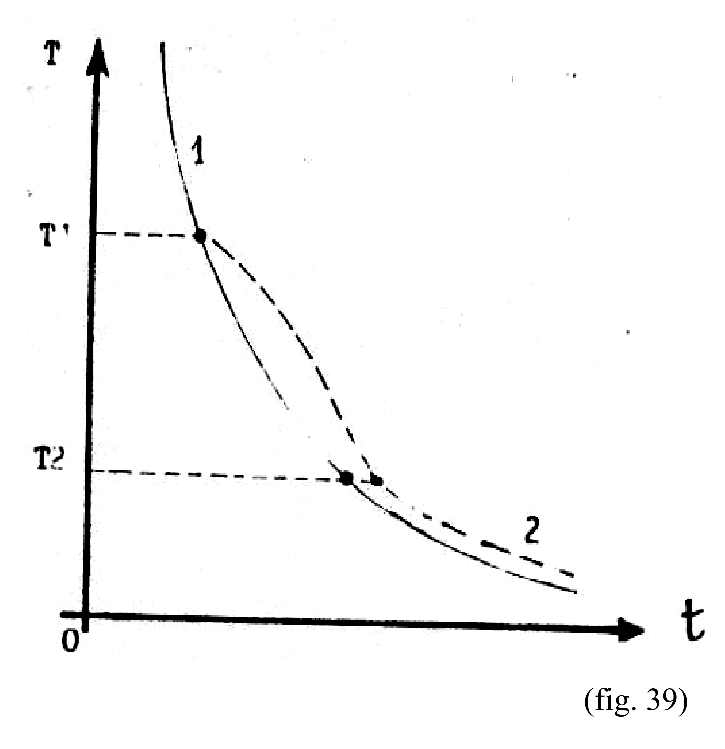
$$dq = - C.dT$$

Si l'on admet que la quantité dq est proportionnelle au temps dt, d'une part et à la différence de température $\Delta T = T - T_0$, d'autre part, on peut écrire :

$$dq = - c.dT = K(T - T_0).dt$$

$$\frac{DT}{T} = \frac{K}{C} dt \quad \Longrightarrow \quad T = T_0 . \exp \left[- \frac{K}{C} t \right]$$

Cela veut dire que la variation de la température du corps en fonction du temps est une fonction exponentielle, (fig. 39). Si le corps étudié subit une transformation avec changement de phase, un dégagement de chaleur se produit et modifie l'allure de la courbe de refroidissement.



Courbe de refroidissement : T = f (t).

(1) : sans changement de phase.

(2) : avec changement de phase entre T_1 et T_2

T_1 : indique le début de la transformation et T_2 la fin de cette transformation

(fig. 39)

Pour étudier la cristallisation d'un corps, on le fond, puis on le place à l'état liquide dans un creuset, lui même enfermé dans une enceinte isotherme, afin de limiter la vitesse de refroidissement. La température à l'intérieur du creuset est mesurée à l'aide d'un thermocouple qui est relié à un enregistreur, ce dernier permet de tracer la courbe de refroidissement T = f(t).

2.3.1. Cristallisation d'un métal pur

Pour un métal pur, la température reste constante pendant toute la durée de la solidification conformément à la règle des phases. En effet entre T_1 et T_2, le corps est à l'état liquide, il y a un seul constituant (le corps pur) et une seule phase (la phase liquide).

$$V = 1 - 1 + 1 = 1$$

Il y a un seul degré de liberté, par conséquent, on peut choisir, à son gré, la température dans cet intervalle sans affecter l'équilibre physico-chimique.

A la température T_1, apparaissent les premiers cristaux solides. Ainsi, la constituant reste la même, alors qu'il y a deux phases : le corps liquide et le corps solide.

$V = 1 - 2 + 1 = 0$

La variance est nulle et la température reste constante pendant toute la durée de la solidification. Ceci est traduit par un palier sur le courbe T = f(t), appelé ''palier de solidification''. La longueur de ce palier est proportionnelle à la quantité de métal solidifié.

Les métaux à l'état pur, ne cristallisent que difficilement.. La cristallisation ne s'amorce qu'en dessous de la température de fusion T_f, voir (fig. 93). On dit que le métal est en ''surfusion''.

Lorsque le refroidissement est très lent, le niveau de surfusion est faible et la cristallisation se produit à une température voisine de celle de l'état d'équilibre. Le degré de surfusion est déterminé par la nature et la pureté du métal. Le plus souvent ΔT = (10 à 30°C), sauf pour les métaux très purs, par exemple $\Delta T(Sn)$ = 118°C et $\Delta T(Sb)$ = 135°C.

La figure 40 représente une courbe de refroidissement d'un système mono-constituant pur.

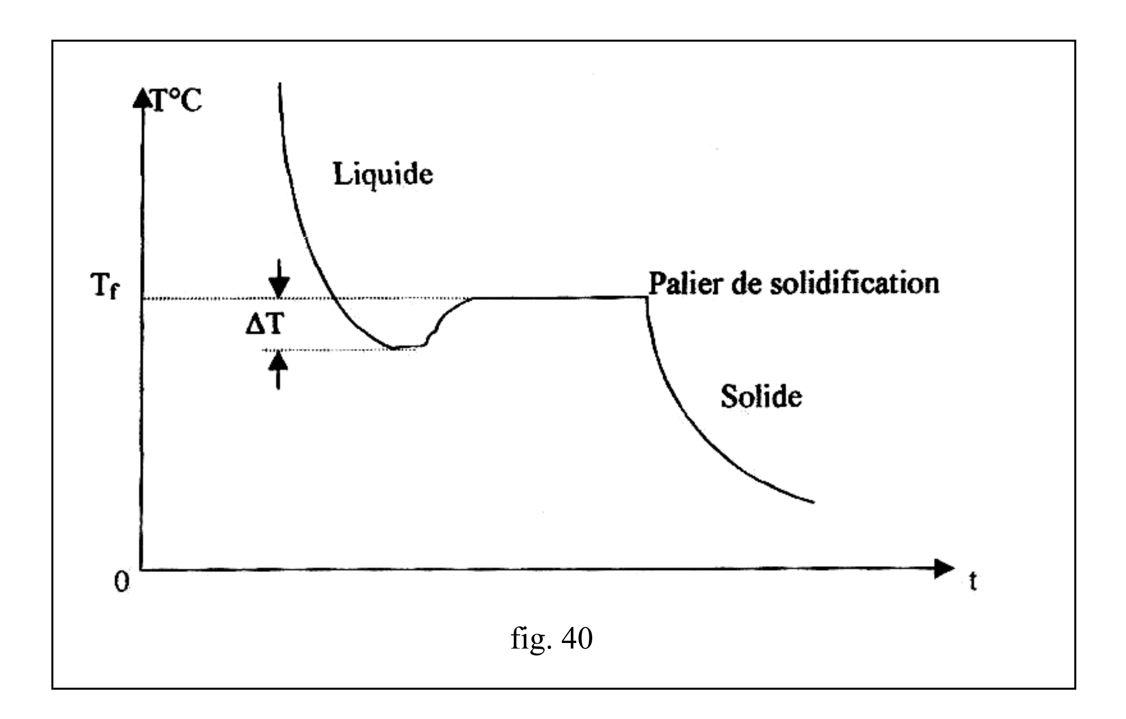
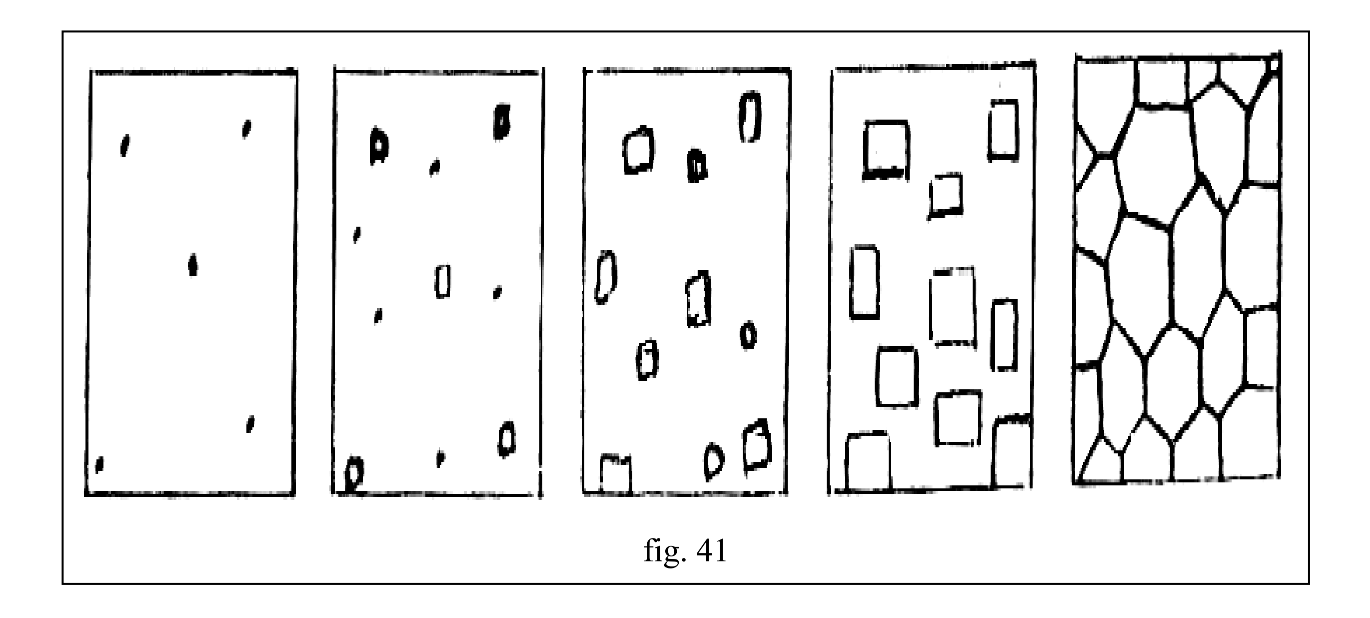


fig. 40

La cristallisation commence par la formation de germes et se poursuit avec leur développement et l'augmentation de leur nombre.

La figure 41, schématise les étapes de cristallisation d'un métal au cours du refroidissement. Tant que les cristaux en formation s'accroissent librement, leur forme géométrique est régulière, mais lorsqu'ils entrent en contact avec d'autres cristaux, leur forme régulière se perturbe et la croissance se poursuit dans la direction qui laisse passer le liquide d'alimentation. Les cristaux primitifs deviennent irréguliers et prennent l'appellation de grains ou cristallites.


fig. 41

2.3.2. Cristallisation d'un alliage

Par alliage, on entend un mélange homogène de deux métaux A et B. A l'état liquide, la solubilité de la plupart des métaux qui forment une solution liquide monophasée est illimitée. Il n'y a que quelques métaux comme le fer et le plomb qui, à l'état liquides sont presque non miscibles l'un dans l'autre et se séparent en fonction de leur densité en deux couches.

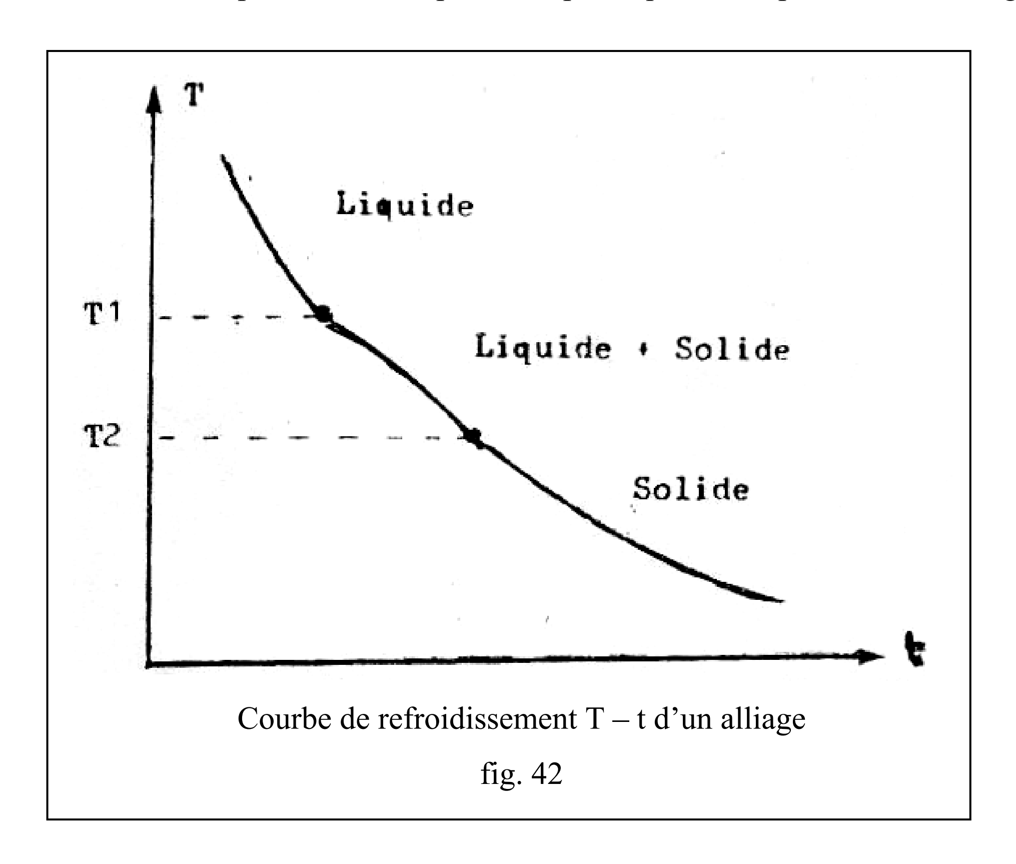
La cristallisation d'un alliage ne se poursuit qu'en cas de surfusion et de formation de germes stables (aptes à la croissance). La composition des phases d'un alliage découle de celle de la solution liquide mère. C'est pourquoi les fluctuations structurales et énergétiques d'un alliage ne suffisent pas pour produire un germe stable.

La solidification d'un alliage impose en plus, des fluctuations de concentrations, il s'agit des écarts momentanés de la composition chimique, de petits volumes isolés par rapport à sa composition moyenne. L'origine des fluctuations est, sans doute, liée à la migration des atomes par diffusion, suite à l'agitation thermique de la solution liquide.

L'analyse thermique dans ce cas, permet de suivre la solidification d'un alliage de l'état liquide à l'état solide. Un exemple du type de courbe de refroidissement qui en résulte est schématisé par la figure 42.

A la température T_1, débute la solidification qui se manifeste sur la courbe ''T - t'', par un changement de pente. Entre T_1 et T_2, on a un domaine biphasé : une phase solide qui se

développe au dépens de la phase liquide à mesure que la température baisse. A partir de T_2, et jusqu'à la température ambiante, la phase présente est complètement solidifiée. Ce genre de courbe de refroidissement peut être établi pour n'importe quelle composition de l'alliage.



Courbe de refroidissement T – t d'un alliage

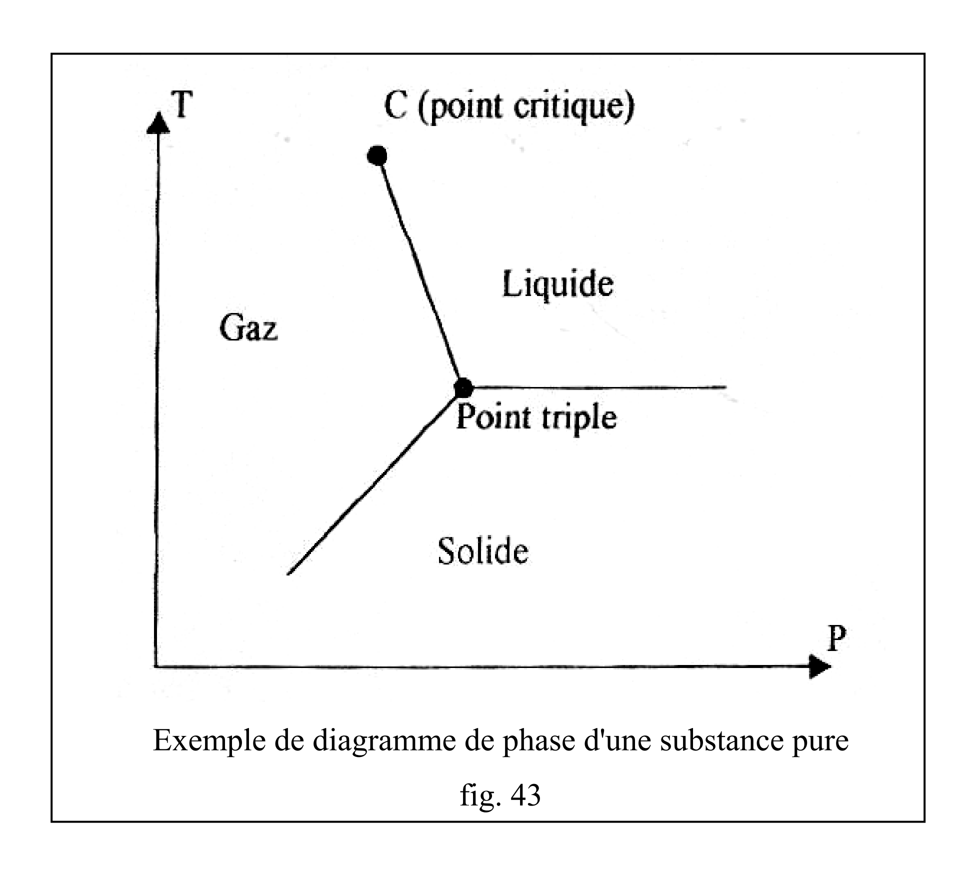
fig. 42

2.4. Diagramme de phase d'une substance pure

C'est le cas où il n'y a pas de variables de composition. Les seules variables sont la température T et la pression P. En général on met en abscisse la température T et en ordonnée la pression P. Nous choisissons le cas contraire dans I'exemple qui suit (fig. 43), pour la conformité avec les autres types de diagrammes.

Dans les cas de cet exemple, les trois branches du diagramme délimitent les trois états du corps correspondant :

- Un état gazeux dans la zone haute température, basse pression.
- Un état solide dans la zone basse température, haute pression.
- Un état liquide dans la zone haute température, haute pression.



Exemple de diagramme de phase d'une substance pure

fig. 43

2 .5. Diagrammes d'équilibre

Pour la détermination des lignes de phases dans le diagramme d'équilibre, une série d'alliages avec différentes compositions du système à étudier sont fondus et successivement refroidis avec l'enregistrement des courbes de refroidissement correspondantes dans un intervalle de temps déterminé (analyse thermique).

Le refroidissement doit s'effectuer très lentement, afin d'avoir, le plus possible, l'état d'équilibre. Dans le domaine de transformation de phases, la variation de la température avec le temps montre une allure discontinue. II apparaît des points de flexion et d'arrêt dans la courbe de refroidissement.

Un type de courbe de refroidissement, pour différents alliages d'un système, dont les composants sont totalement miscibles à l'état solide et liquide, est représenté sur la figure 44.

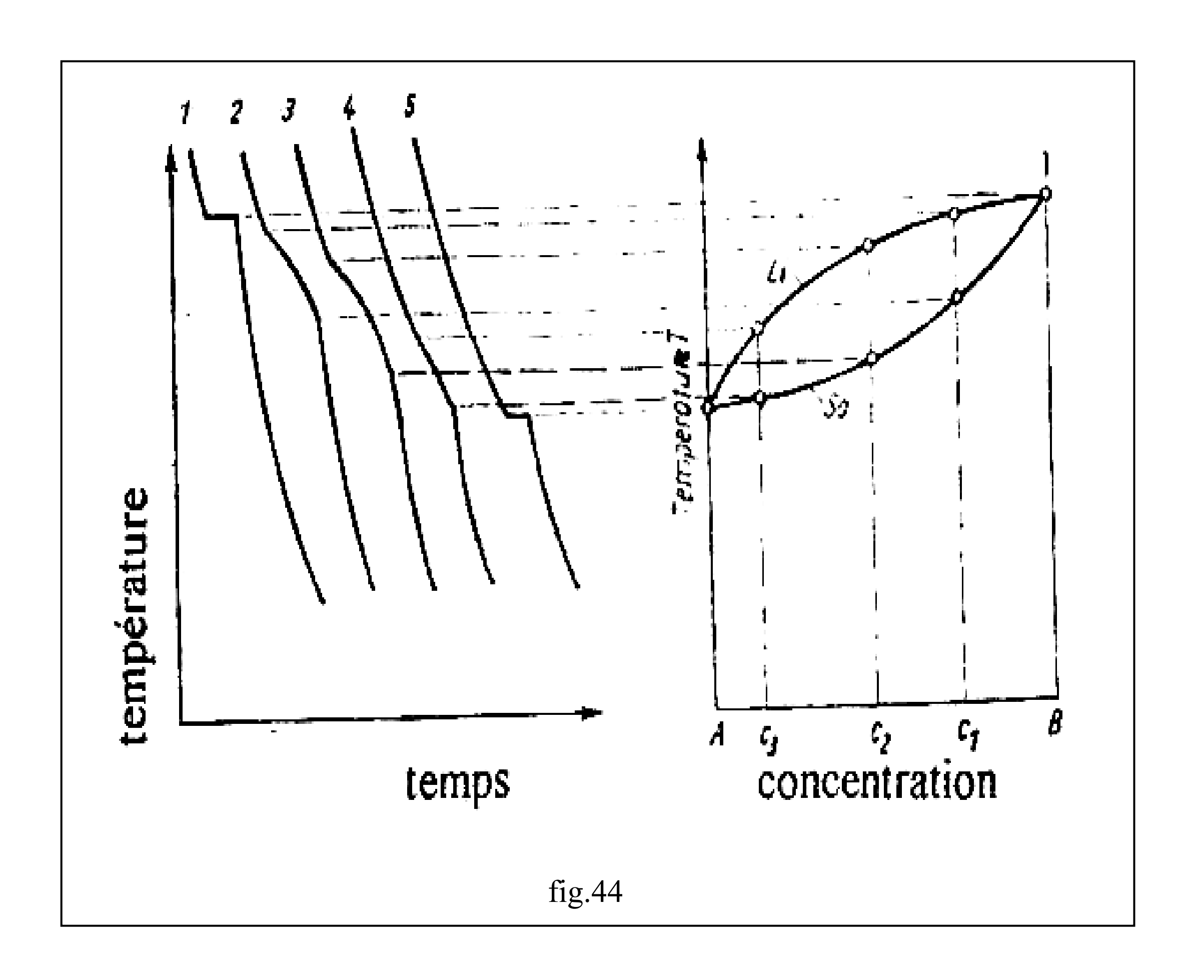


fig.44

Les valeurs de température-concentration, donne les points avec lesquels les lignes de limites de phases peuvent être construites et les domaines d'existence de chaque phase peuvent être représentés graphiquement. Les conditions pour que apparaissent les points de flexion et d'arrêt dans les courbes de refroidissement sont déterminées par le nombre de phases se trouvant en équilibre les unes avec les autres, c'est à dire, par le nombre de degrés de liberté du système.

Pour la détermination des transformations des phases à l'état solide, on utilise le plus souvent, outre l'analyse thermique, le procédé de dilatométrie, surtout dans le cas où on ne peut pas obtenir les résultats envisagés avec l'analyse thermique. Cette méthode est utilisée pour la mesure des variations des volumes spécifiques liés avec la transformation des phases. On ne mesure pas directement la variation, mais la dépendance de la température suite aux variations de volumes (variation de dimensions) de l'éprouvette.

A cause des dimensions des longueurs à mesurer, qui sont relativement petits (10^{-4} à 10^{-5} mm), on utilise des méthodes d'enregistrement avec amplification mécanique, optique ou électronique. La figure 45 représente la courbe dilatométrique du fer.

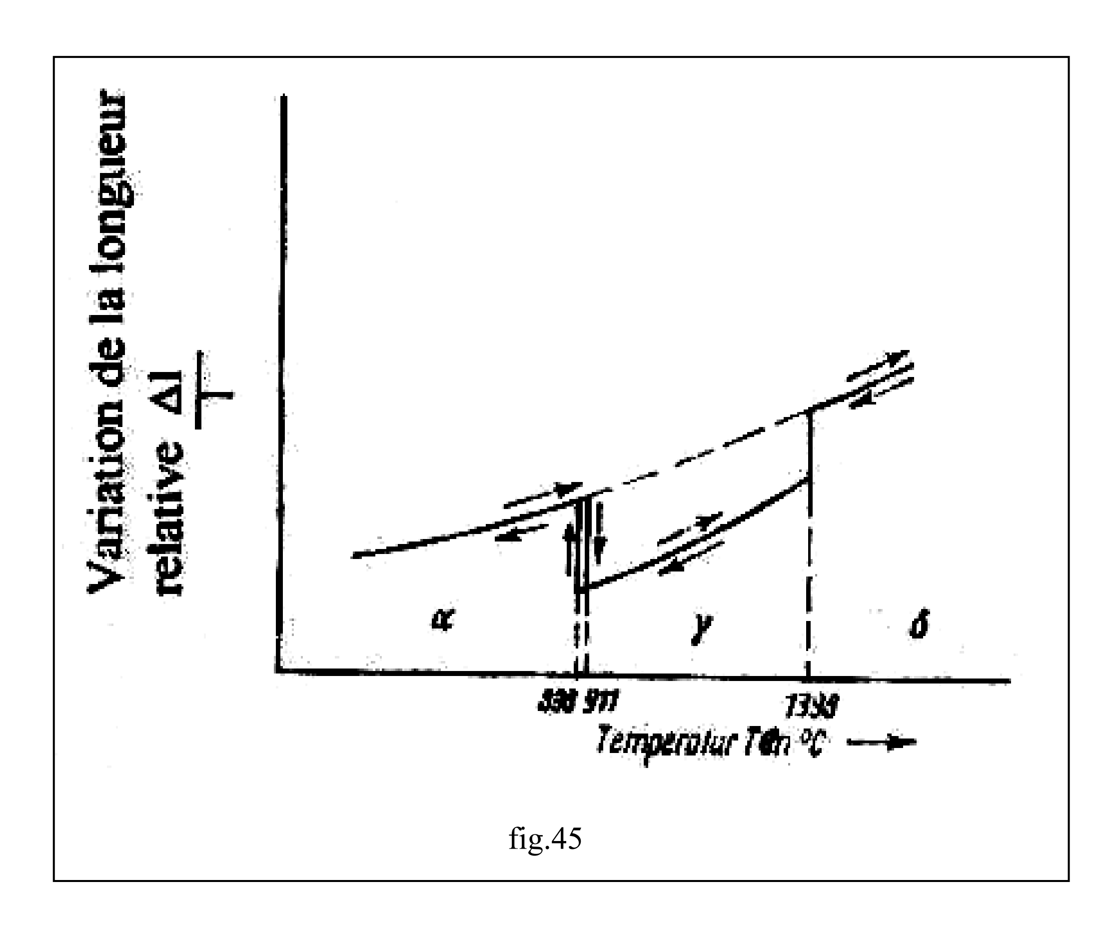


fig.45

La diminution du volume (raccourcissement de l'éprouvette), lors de la transformation des phases α et δ (cubique centré) en phase γ (cubique à faces centrées), est due à l'empilement très compact de la phase γ. Les températures de transformation des phases α et δ sont différentes selon qu'il s'agisse d'un chauffage ou d'un refroidissement.

Les températures de transformation obtenues à partir des courbes de dilatométrie, peuvent être dévalées lorsque la composition est modifiée par l'addition d'autres éléments d'alliages.

Les méthodes représentées pour la détermination des points de transformation de phase sont valables uniquement pour les systèmes pour lesquels l'état d'équilibre thermodynamique, peut être mis au point dans un intervalle de temps très court.

Si l'état d'équilibre n'est atteint qu'après un temps très lent à cause de la vitesse de réaction qui est très faible (dans le cas des systèmes de silicates), dans ce cas, on utilise la méthode de trempe qui consiste à refroidir le système dans un milieu de trempe à l'eau, à l'huile, etc.

Les phases obtenues pour les différentes températures à l'équilibre sont fixées pour chaque éprouvette à la température ambiante Elles peuvent être identifiées à l'aide du microscope ou par rayon X.

2.5.1. Principaux types de diagrammes d'équilibre du système binaire

2.5.1.1. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité totale des composants à l'état solide et liquide.

Le type de ce diagramme est représenté sur la figure 46 avec la courbe de refroidissement et structure de la miscibilité des composants A et B.

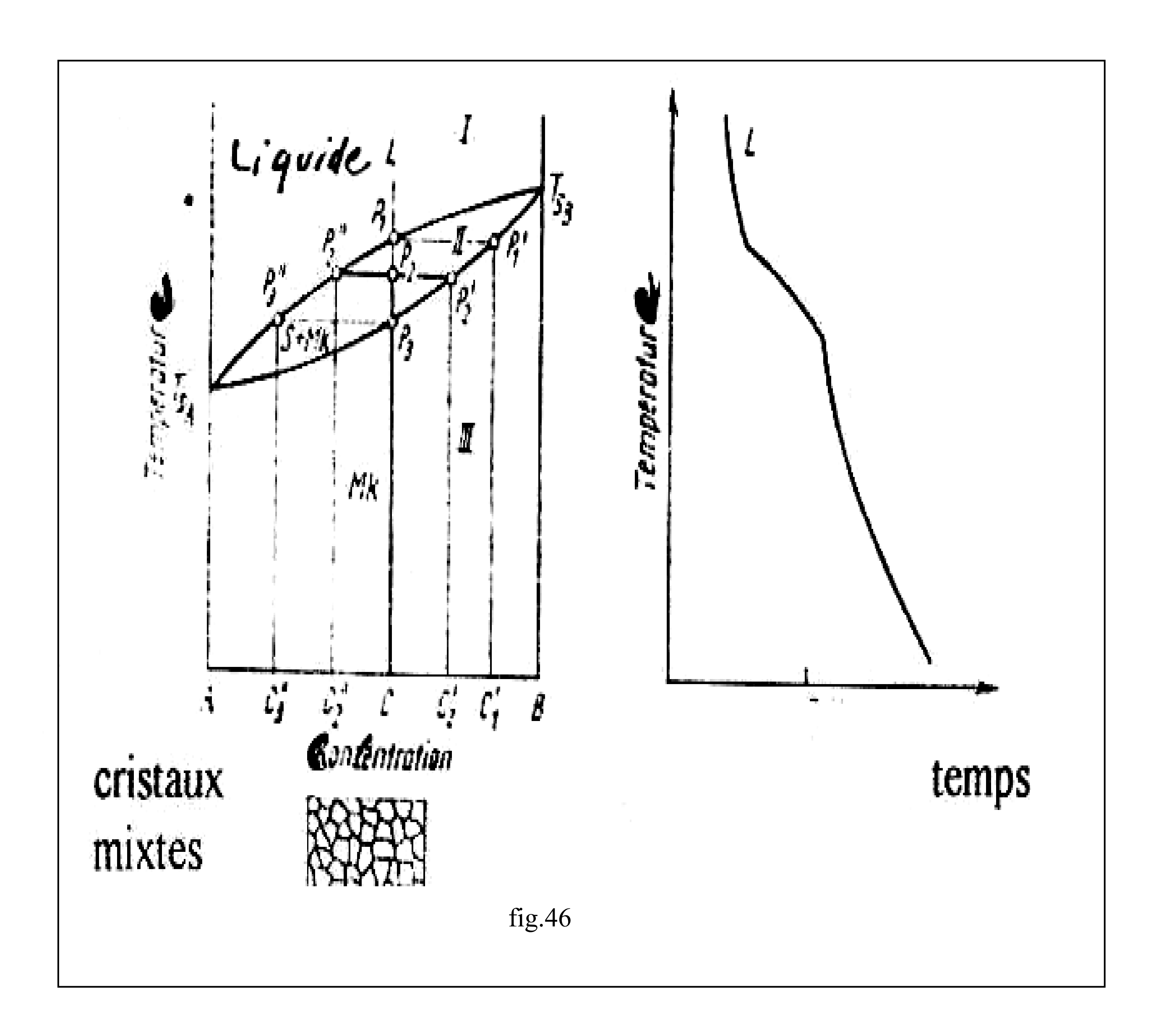


fig.46

Les lignes liquidus et solidus délimitent dans ce diagramme trois domaines :

Dans le domaine I, et aux températures supérieures à la ligne liquidus, se présente uniquement une phase qui est le liquide homogène.

Dans le domaine II, entré le liquidus et le solidus, existent le liquide et les cristaux mixtes comme phase thermodynamiquement stable.

Dans le domaine III, au dessous de la ligne solidus, où se trouve seulement une phase solide, les cristaux mixtes de substitution dont les paramètres du réseau sont linéaires et dont la composante A pure peut passer dans la composante B pure. Pour un système homogène, la loi de Gibbs donne une relation entre le nombre de composants K, le nombre de phases P et le nombre de degré de liberté F.

$$F = K + 2 - P$$

Le nombre de degrés de liberté F signifie le nombre de grandeurs d'état (pression, température, concentration) qu'on peut choisir librement et lesquelles peuvent varier indépendamment l'une de l'autre sans que le nombre de phases varie.

Si on considère la pression constante (P = cst), l'équation de Gibbs peut s'écrire :

$$F = K + 1 - P$$

Pour ce système, on peut déterminer le nombre de degrés de liberté dans chaque domaine. Pour le domaine I, où ($K = 2$, $P = 1$) et $F = 2$, cela signifie que la concentration et la température peuvent être choisies librement dans ce domaine. Les mêmes rapports se trouvent dans le domaine II, où le nombre de degrés de liberté $F = 1$ (pour $K = 2$ et $P = 2$). Cela signifie qu'on peut varier librement une seule grandeur d'état soit la température ou la concentration. Si on considère la courbe de refroidissement d'un alliage L (figure ci-dessous) avec une composition C, à l'état d'équilibre, on peut constater les phénomènes suivants :

Dans le domaine I, il existe un liquide homogène, sa composition correspond à la concentration C ou 1 - C correspondant respectivement à la composante B ou A dans l'alliage. Lors du refroidissement, et lorsque le point P_1, de la ligne liquidus est atteint, il y a précipitation des cristaux mixtes à partir du liquide.

La composition de ces cristaux mixtes est C'_1, elle est déterminée sur les coordonnées de concentrations du point P'_1, représentant l'intersection de $P_1P'_1$ avec la ligne solidus. La vitesse de refroidissement diminue avec l'énergie libre de cristallisation. La courbe de refroidissement

est caractérisée par un point de flexion.

Les cristaux mixtes ayant la concentration C'_1, contiennent plus d'atomes B que la composition de l'alliage correspondant. Avec la diminution de la température, se précipitent encore les cristaux mixtes riches en composante B et la concentration de la composante B dans le liquide diminue. Lorsque la température de l'alliage aura atteint le point P_2, les cristaux mixtes ont la concentration C'_2, tandis que la concentration dans le liquide est C''_2. Les concentrations C'_2 et C''_2 sont obtenues par l'intersection $P''_2\ P'_2$ avec la ligne solidus et liquidus.

Au point P_3, la température solidus de l'alliage est atteinte, la concentration des composants dans les cristaux mixtes correspond à la composition de l'alliage et le liquide résiduel (non solidifié) possède la concentration C''_3. Au dessous de la température solidus, existant uniquement les cristaux mixtes solides. La vitesse de refroidissement est de nouveau élevée, car il n'y a pas de chaleur de cristallisation libre et dans la courbe de refroidissement l'on a encore un point d'inflexion. Pendant la solidification, la composition des cristaux mixtes varie de la concentration C'_1 à C'_2.

La compensation de concentration s'effectue selon un processus de changement de place, si leur compensation totale n'est pas possible à cause de la rapidité de refroidissement, il se forme à l'intérieur des cristallites, une différence de concentration, appelée ségrégation de cristaux (ce genre de cristallite est appelé cristaux mixtes zonaux).

Les quantités des phases liquides et cristaux mixtes se trouvant au point P_2, sont déterminées par la position de ce point par rapport aux lignes solidus et liquidus.

La quantité de la phase liquide est désignée par m_L et la quantité de la phase de cristaux mixtes est désignée par m_C. Donc la quantité unitaire totale de l'alliage sera :

$$m_L + m_C = 1$$

La concentration C de la composante B dans l'alliage total se détermine à partir de la quantité B se trouvant dans le liquide et dans les cristaux mixtes en tenant compte de la concentration d'équilibre dans les deux phases C''_2 et C'_2 .Et selon la loi de levier on peut déterminer m_C et m_L :

$$\mathbf{m_L\, C''_2 + m_C\, C'_2 = C}$$

$$\mathbf{m_C = 1 - m_L}$$

$$m_L = \frac{C'_2 - C}{C'_2 - C''_2}$$

$$m_C = \frac{C - C''_2}{C'_2 - C''_2}$$

$$\frac{m_C}{m_L} \quad \frac{C - C''_2}{C'_2 - C}$$

Donc le diagramme d'équilibre permet, non seulement, de définir le nombre et type de phases existant pour les différentes températures et concentration mais aussi de déterminer les quantités de ces phases dans la structure. La miscibilité totale des deux composantes à l'état solide et liquide présente un cas limite de la formation d'alliages.

2.5.1.2. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité totale des composantes à l'état liquide et non miscibilité totale à l'état solide.

Le diagramme d'équilibre, les courbes de refroidissement des alliages L_1 et L_3, ainsi que leur structure sont représentés sur la figure 47.

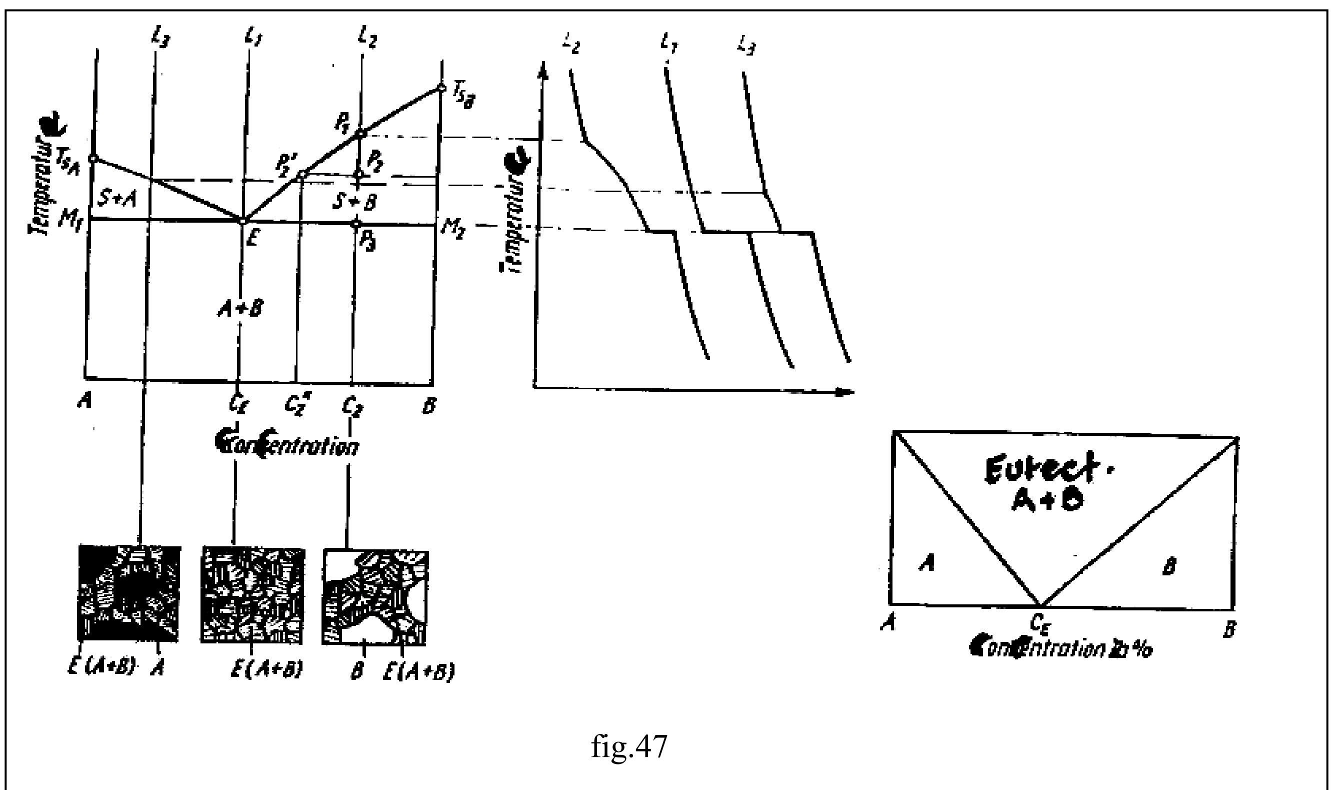


fig.47

Ils existe quatre lignes limites de phases formant quatre domaines séparés. Au dessus de la ligne liquidus, T_{SA}, E et T_{SB} existe le domaine du liquide homogène Les températures de solidification des composantes pures T_{SA} et T_{SB} diminuent avec l'addition de la deuxième composante.
La température du liquidus de l'alliage en dépendance de la concentration peut être déterminée selon Roozeboom, à partir du point de solidification de la composante B pure.

$$\mathbf{T_{SC} = \frac{T_{SB} \cdot U_B}{U_B - R.T_{SB}.LnC}}$$

T_{SB} : température de solidification de la composante B.

Tsc : température de liquidus de l'alliage.

R : constante des gaz.

U_B : chaleur de fusion molaire de la composante B.

C : concentration de la composante B dans l'alliage.

La même expression est valable pour la composante A. Cette relation nous fournit des courbes qui décroissent avec l'augmentation de la concentration de la deuxième composante. Elles se

coupent au point E du diagramme d'équilibre. Le point E désigne le point eutectique et auquel se trouvent trois phases en état d'équilibre, l'une avec l'autre (liquide, phase A et phase B).

En utilisant la loi des phases, on obtient à ce point K = 2, P =3, et le nombre de degrés de liberté F = 0.

Si on considère l'allure de la courbe de refroidissement de l'alliage L_1 avec la concentration C_E.. L_1 est un alliage eutectique, à la température T_E, il y a cristallisation des phases solide A et B. Les phases solides des composantes A et B sont identiques, car les composantes représentent une non miscibilité totale à l'état solide.

La courbe de refroidissement de cet alliage présente un point d'arrêt à la température eutectique T_E à cause de F = 0, c'est à dire la température T_E reste longtemps constante jusqu'à ce que la totalité du liquide soit consommée selon la réaction eutectique :

$$\mathbf{L} \underset{}{\overset{\mathbf{T,\ P\ =\ const.}}{\rightleftarrows}} \mathbf{A+B}$$

Puisque la température de solidification de l'eutectique se trouve très au dessous de la température de solidification des composantes pures, il se forme une infinité de germes de cristallisation qui s'empêchent de s'accroître et ce qui donne, le plus souvent, une structure lamellaire à grains fins, tels que l'exemple des aciers hypereutectoïdes représentés sur la figure 48.

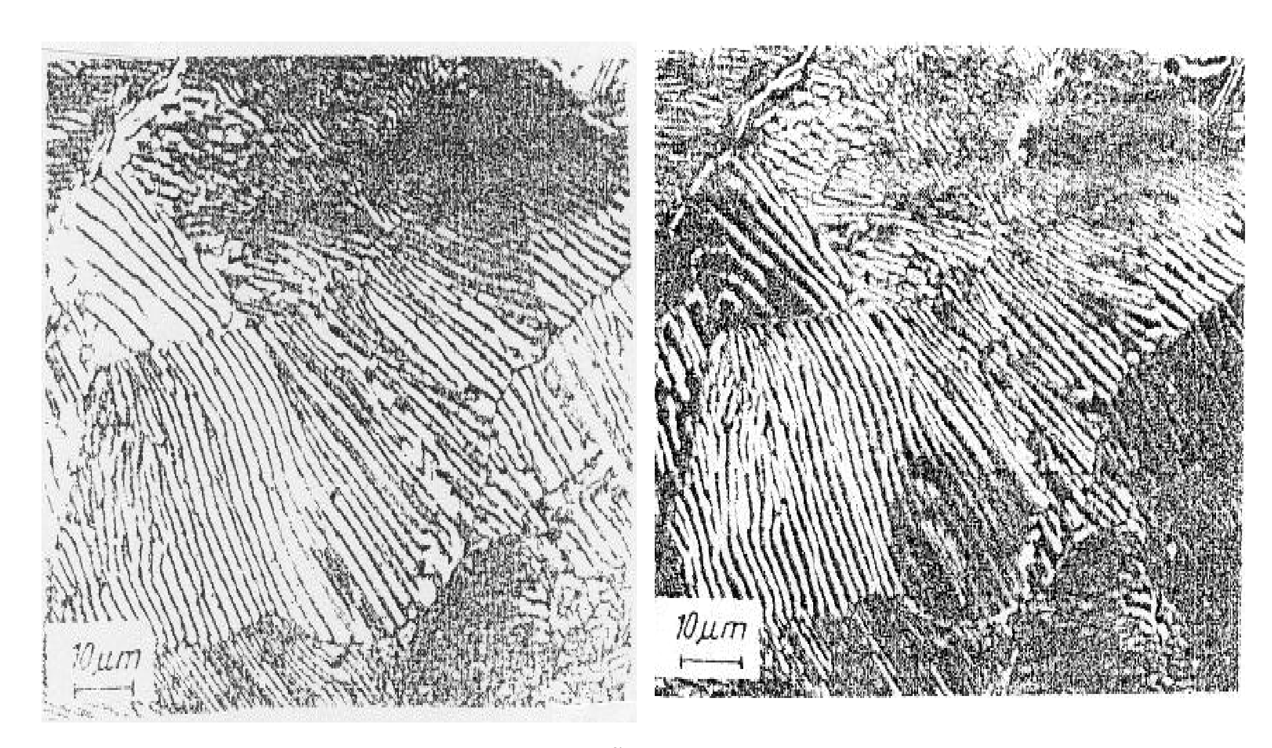


fig.48

Les alliages eutectiques sont les plus utilisés dans l'industrie, à cause de leur point de fusion faible, leur structure fine et leurs bonnes propriétés mécaniques. Au dessous de le ligne liquidus, deux phases séparées l'une de l'autre par l'eutectique, où les cristaux de la composante A et B se trouvent en état d'équilibre avec le liquide. La règle de phase de Gibbs donne pour les deux domaines de phases, le nombre de degré de liberté F = 1.

Si on commence le déroulement du refroidissement de l'alliage L_2 avec la concentration C_2 et lorsque l'alliage L_2 aura atteint Ie point P_1 de la ligne Iiquidus, à cet instant, commence la précipitation des cristaux de la composante pure B à partir du liquide à cause de la chaleur libre de cristallisation, la vitesse de refroidissement de l'alliage diminue et un point d'inflexion apparaît dans la courbe de refroidissement.

La précipitation des cristaux de la composante B continue à augmenter avec la diminution de la température, ce qui fait changer la composition du liquide. Lorsque le point P_2 de la ligne liquidus est atteint, la concentration est C''_2. Selon l'équation de Roozboom, la température de solidification du liquide diminue avec la diminution de la concentration de la composante B.

Au point P_3, la température de solidification T_E de l'eutectique est atteinte et le liquide restant, possède la composition eutectique C_E, à ce moment se précipitent simultanément les cristaux de la composante B et A, c'est à dire la solidification du liquide restant, s'effectue eutectiquement. Dans la courbe de refroidissement de l'alliage L_2 apparaît à la température T_E, un point d'arrêt où $P = 3$, $K = 2$ et $F = 0$.

Dans la structure de l'alliage L_2 existe à coté des cristaux primaires de la composante B, l'eutectique se composant de cristaux fins des composantes A et B. Les rapports analogues sont valables pour les alliages à intervalle de concentration $0 \leq C \leq C_E$, dans ce cas, les cristaux primaires sont composés de A et de l'eutectique. Pour le point P_2, on peut déterminer la quantité de cristaux B selon l'expression :

$$\frac{\textbf{Quantité de cristaux B}}{\textbf{Quantité du liquide restant}} = \frac{C_2 - C''_2}{1 - C_2}$$

De la même façon, les quantités de A, B et de l'eutectique peuvent être déterminées.

2.5.1.3. Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité complète des composants à l'état liquide et miscibilité partielle à l'état solide

Les systèmes ou diagrammes d'équilibre déjà envisagés, sont des cas limites de miscibilité complète et de non miscibilité à l'état solide. Il existe d'autres systèmes qu'on va considérer dans cette partie, dont les composantes sont miscibles seulement à une étendue limitée, et le plus souvent, utilisés en pratique.

Dans un tel système, (fig. 49), on peut constater la présence de deux nouvelles phases α et c.

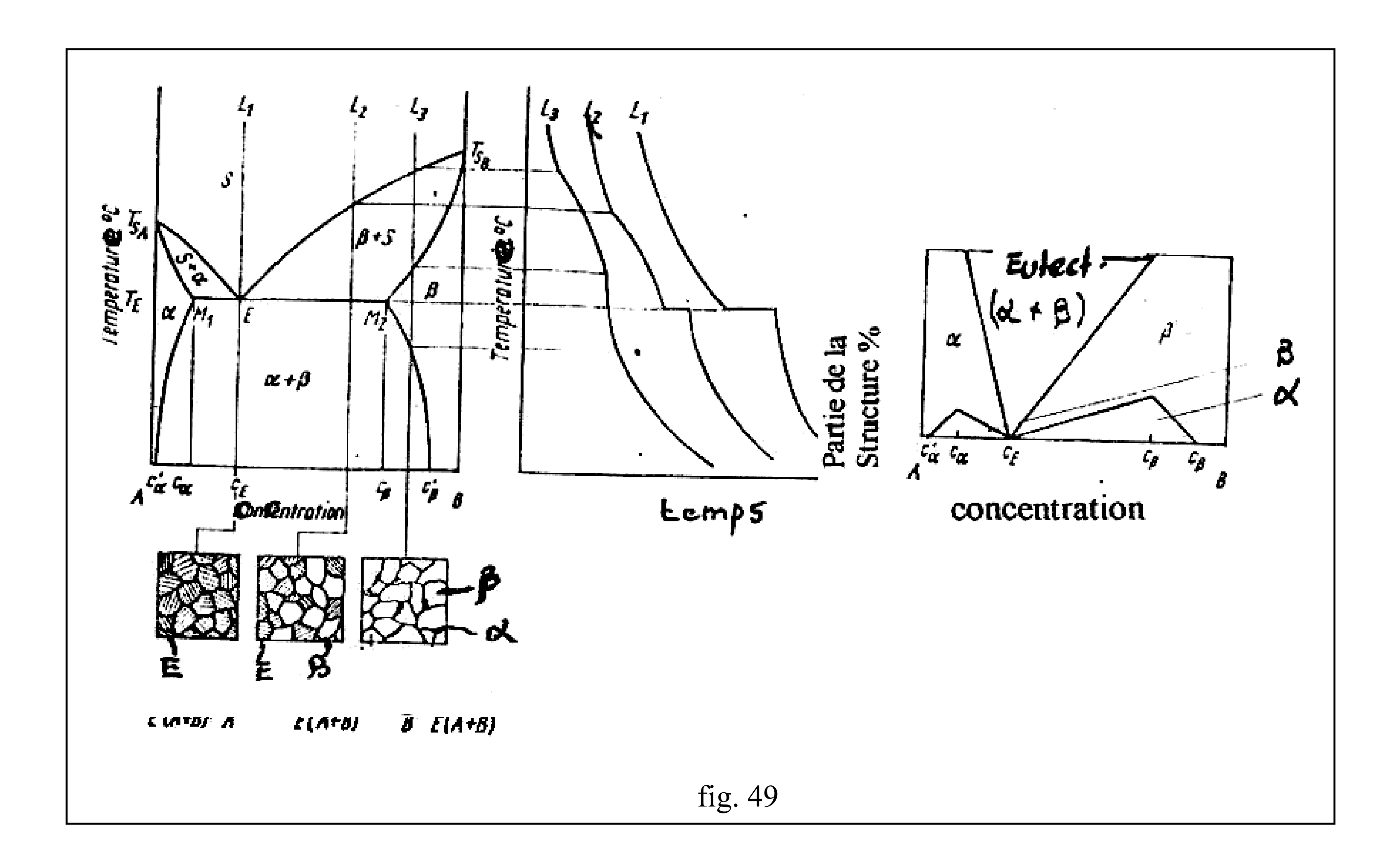


fig. 49

Les cristaux mixtes α possèdent le réseau fondamental du réseau cristallin de la composante A, de même que les cristaux mixtes β possèdent le réseau fondamental du réseau cristallin de la composante B. Ces deux cristaux peuvent apparaître comme cristaux mixtes de substitution ou d'intercalation et sont thermodynamiquement stables seulement pour certains domaines de concentrations en dépendance de la température.

Dans le diagramme, (fig. 102), apparaît une séparation eutectique. La ligne liquidus $T_{SA}ET_{SB}$ de ce diagramme, présente principalement la même allure comme dans le système avec miscibilité complète. L'allure de la ligne solidus est donnée par la courbe $T_{SA}M_1M_2T_{SB}$. La séparation du liquide homogène s'effectue selon la réaction :

$$\mathbf{L} \underset{}{\overset{\mathbf{T,\ P\ =\ const.}}{\rightleftarrows}} \boldsymbol{\alpha + \beta}$$

Cette réaction est différente de celle déjà étudiée dans les diagrammes d'équilibre précédents où elle est donnée sur la totalité du domaine de concentration de 0 jusqu'à 1, mais seulement dans

l'intervalle $C_\alpha \leq C \leq C_\beta$ où C_α et C_β sont les concentrations d'équilibre dans les phases de cristaux mixtes α et β à la température eutectique T_E.

Dans les intervalles de concentration $0 < C < C_\alpha$ et $C_\beta < C < 1$, le liquide se solidifie selon le système à miscibilité totale à l'état liquide et solide. A l'état solide, apparaît d'autres lignes limites de phases avec les courbes $M_1C'_\alpha$ et $M_2C'_\beta$ qui donnent les limites de solubilité des cristaux mixtes α et β pour le composantes A et B.

Au point M_1, et à la concentration C_α, les cristaux mixtes α possèdent la solubilité maximale pour la composante B, avec la diminution de la température, diminue le nombre d'atomes B solubles dans le réseau cristallin de la composante A, ils se diffusent alors dans le domaine du réseau cristallin où l'énergie est favorable.

Dans cette position, la concentration C_β, augmente et se forme le réseau cristallin de la composante B, et les cristaux mixtes β se séparent sous la forme de ségrégation.

Les limites de solubilité sont, le plus souvent, déterminées par les méthodes de mesures magnétiques ou radiographiques. Les réactions de démixtion (séparation) peuvent s'effectuer non seulement dans le liquide homogène mais aussi à l'état solide sous la forme de réaction eutectique.

$$\gamma \xrightleftharpoons{\textbf{T, P = const.}} \boldsymbol{\alpha + \beta}$$

Un autre type de réaction pouvant s'effectuer pour les trois phases se trouvant en état d'équilibre, l'une avec l'autre, est la réaction péritectique. Elle est caractérisée par la précipitation des cristaux mixtes du liquide, par exemple, la réaction des cristaux mixtes β en cristaux mixtes α. Le diagramme d'équilibre d'un système péritectique est représenté par la figure 50.

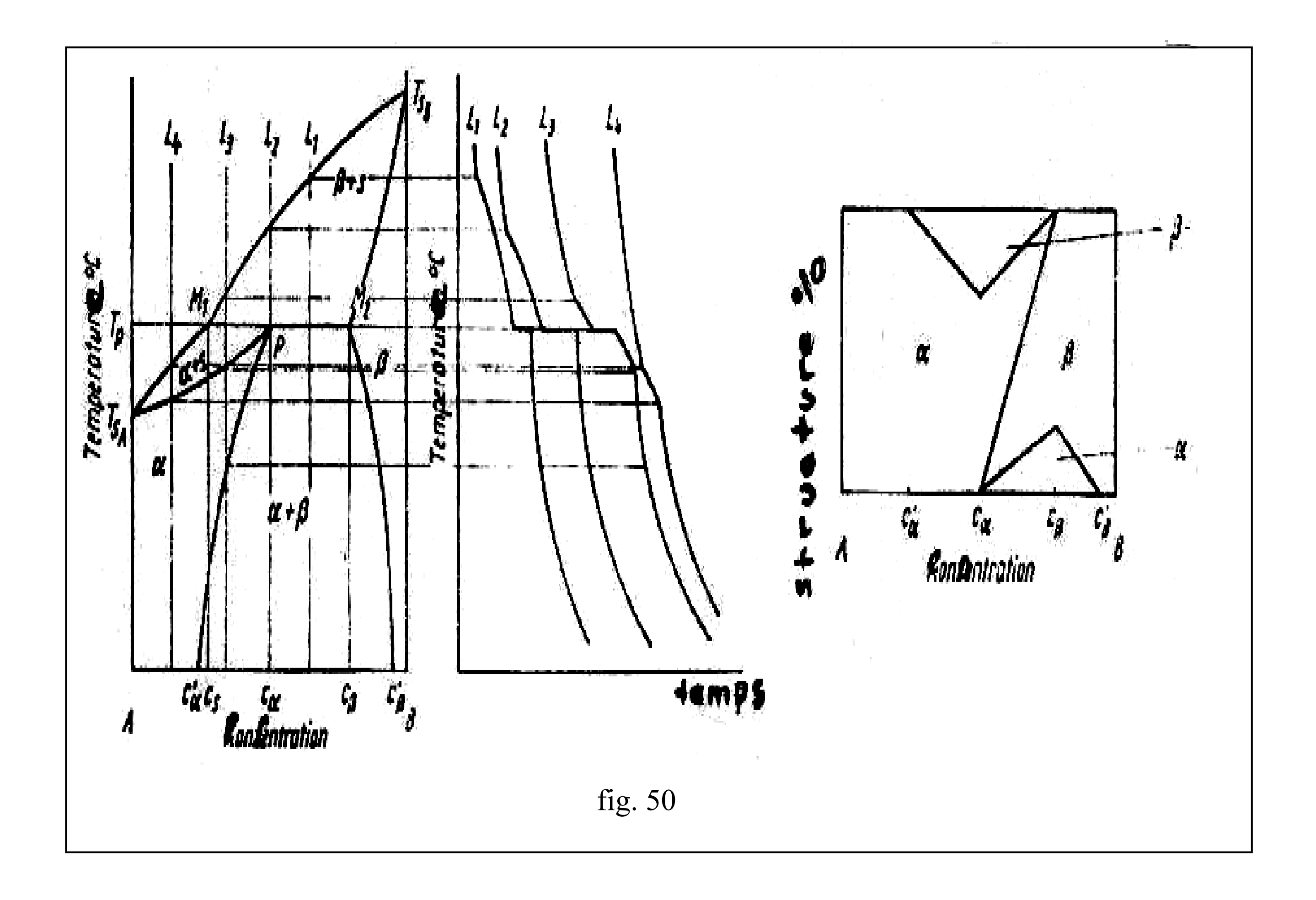


fig. 50

Dans l'intervalle de température $T_{SB} > T > T_P$, se précipitent les cristaux mixtes β à partir du liquide homogène. Leur concentration d'équilibre varie suivant la ligne $T_{SB}M_2$ et atteint, à la température $T = T_P$, la valeur maximale C_β. La composition du liquide varie suivant la ligne $T_{SB}M_1$ et possède an point M_1 la valeur C_S.

Lorsque la température péritectique T_P est atteinte, il y a transformation (recomposition) des cristaux mixtes β avec le liquide en cristaux mixtes α dont la concentration d'équilibre prend la valeur C_α. La loi de phase donne pour le point péritectique P, le nombre de degrés de liberté $F = 0$ avec $C = 2$ et $P = 2$.

Les courbes de refroidissement des alliages dont la composition se trouve dans l'intervalle $Cs \leq C \leq C_\beta$ (L1, L2, L3) doivent posséder un point d'arrêt. La température reste longtemps constante, jusqu'a ce que le liquide ou les cristaux mixtes β sont consommés à la transformation péritectique. Les alliages dont la composition se trouve dans l'intervalle $C_\alpha \leq C \leq C_\beta$ (L_1), possèdent une grande quantité de cristaux mixtes β, lesquels sont consommés avec le reste du liquide lors de la transformation péritectique.

Après solidification, la structure est composée de cristaux mixtes α formés lors de la transformation péritectique et de reste de cristaux mixtes β. Les alliages qui ne sont pas compris dans l'intervalle de concentration $C_s \leq C \leq C_\beta$ se solidifient selon le système à miscibilité complète, dont la précipitation des cristaux mixtes α s'effectue dans l'intervalle $0 < C < C_S$ et celle de β dans l'intervalle $C_\beta < C < 1$.

A l'état solide, la solubilité des cristaux mixtes α se rétrécit suivant la ligne PC'_α, et pour β suivant la ligne $M_2C'_\beta$.

La structure contient des ségrégations de cristaux mixtes α et β dont la quantité est donnée sur le rectangle de structure de la figure 50.

2.5.1.4. Diagramme d'équilibre d'un système avec phases intermétalliques

Les composantes d'un système peuvent former une ou plusieurs phases intermétalliques ayant la forme générale AmBn (m, n = 1, 2, 3, …). Le nombre et la forme des lignes limites de phases dans le diagramme d'état dépendent principalement des propriétés des phases intermétalliques, lesquelles sont déterminées par les composantes A et B.

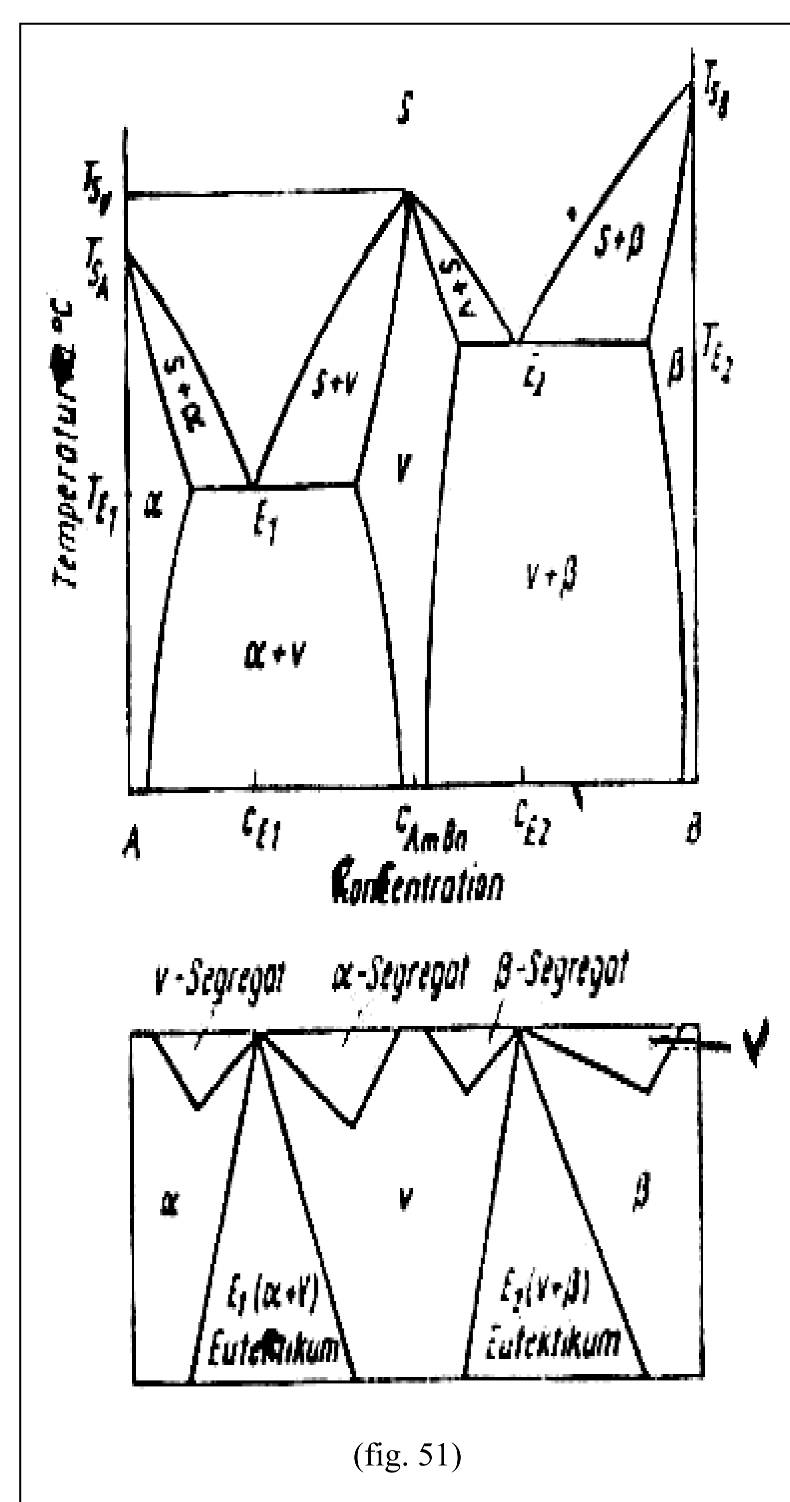
Le réseau cristallin des phases intermétalliques est très compliqué et plusieurs possibilités peuvent exister, notamment :

a. La phase intermétallique se cristallise à partir du liquide et peut dissoudre dans son réseau les atomes des composantes A et B dans un étendu limité, donc dans un certain domaine de concentration, ou elle peut aussi exister sous la forme de la composition C_{AmBn}.

b. La phase intermétallique se forme ensuite à la transformation péritectique, comme suite d'une réaction entre deux liquides.

La figure 51 montre le diagramme d'état d'un système avec phases intermétalliques AmBn, et caractérise la composition moyenne. Pour AmBn, correspond la concentration C_{AmBn} et pour laquelle on a un maximum dans la ligne liquidus.

Plus la température de fusion de la phase intermétallique est élevée, plus l'énergie de sa formation est grande. La courbe de refroidissement d'un alliage avec composition AnBm et à la température T_{SV}, est caractérisée par la présence d'un point d'arrêt.



(fig. 51)

Diagramme d'équilibre d'un système avec miscibilité complète des composantes A et B à l'état liquide et miscibilité partielle à l'état solide et dans lesquelles la phase intermétallique se forme jusqu'au point de fusion V(AmBn).

Le comportement d'une phase intermétallique lors de la solidification est le même que celui du métal pur. Le diagramme d'état peut se décomposer en deux diagrammes de solidification eutectiques, dont le premier se compose de la composante A et V et l'autre de la composante V et B. Lors de la solidification, les mêmes process s'effectuent dans chaque diagramme.

3.Métaux et alliages non ferreux

3.1. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium est un élément du IIIème groupe de la classification de Mendeléev, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique 26,98 (environ 27). L'aluminium possède un réseau cubique à faces centrées à équidistance : a = 4,0412 Å, sa caractéristique la plus importante est la faible densité 2,7 g/cm^3 (celle du fer 7,8 g/cm^3 et celle du cuivre 9 g/cm^3). L'aluminium représente environ 7,5 % en masse dans l'écorce terrestre.

L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières qu'il présente :

- Légèreté et bonne résistance, ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne conductivité de chaleur et d'électricité.
- Bonne tenue à la corrosion grâce à la formation en surface d'une pellicule très fine, ≈ 0,7 µm, et très résistante de Al_2O_3, (plus l'aluminium est pur plus sa tenue à la corrosion est élevée). L'aluminium, en contact avec l'oxygène de l'air, forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 qui protège le métal contre les attaques chimiques. Cette pellicule est non soluble dans l'eau, donc l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et il est très utilisé surtout dans l'industrie chimique et alimentaire.
- Possibilité facile de déformation et de soudage.

3.2. Elaboration de l'aluminium

Le minerai utilisé pour l'élaboration de l'aluminium est la bauxite, c'est un oxyde d'aluminium contenant des impuretés tels que la silice, l'oxyde de fer et l'oxyde de titane. Le constituant essentiel est l'aluminium hydraté sous différentes formes : $Al_2O_3.H_2O$ et $Al_2O_3.3H_2O$. Les deux types de bauxites sont :

- Les bauxites rouges dont la teneur en oxyde de fer est relativement élevée.
- Les bauxites blanches, qui contiennent peu de fer, mais beaucoup de silice.

Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison

de leur faible teneur en silice (< 5%).

La composition chimique moyenne d'une bauxite rouge est la suivante :

Al_2O_3 : 53 %, SiO2 : 4 %, H_2O : 13 %, Fe_2O_3: 25 %, Ti O_2 : 3 %

Les bauxites blanches servent à la fabrication de ciment, d'abrasif et de produits réfractaires. La bauxite se prépare le plus souvent selon le procédé BAYER et selon les étapes suivantes :

a. Concassage de la bauxite :

La bauxite est concassée et éventuellement broyée après séchage.

b. Attaque de la bauxite par la soude (Na OH) concentrée :

L'opération s'effectue dans des autoclaves à une température T = 170°C et une pression de 7 atmosphères. La bauxite est dissoute sous forme d'aluminate de sodium. Le fer ne se dissout pas, tandis que l'acide silicique passe dans les silicates de Na et Al :

$$Na\ OH + Al\ (OH)_3 \rightarrow Na\ A1O_2 + 2H_2O$$

Ce qui entraîne une perte en Al et NaOH. L'opération se fait généralement en marche continue par passage à travers une série d'autoclaves pour une durée de 6 à 8 heures. La lessive obtenue contient en plus de la soude concentrée, 270g de Al_2O_3 par litre.

c. Séparation de l'aluminate de sodium et précipitation de l'alumine :

La lessive est extraite des autoclaves pour être diluée afin d'obtenir une bonne concentration du reste de la solution et de la boue. Apres dilution, concentration et filtrage, on obtient une liqueur claire dans laquelle l'aluminium est dissous, elle est en vouée ensuite aux réservoirs de précipitation où s'effectue a 60°C, l'opération inverse de la réaction de dissolution :

$$Na\ AlO_2 + 2H_2O \rightleftarrows Al\ (OH)_3\ \ Na\ OH$$

La cristallisation de AI $(OH)_3$ pur, s'effectue très lentement. En cinq jours, il y a dépôt d'environ 60 % de 1'alumine contenue dans l'aluminate. Pour accélérer le processus de dépôt, on ajoute à la liqueur claire, de 1'hydroxyde d'aluminium solide (moyens de génération).

A la fin, Al $(OH)_3$ cristallisé, est aspiré et filtré de la lessive et séché, ensuite acheminé vers les fours rotatifs. Le résidu de filtration subit l'opération de concentration par évaporation avant d'être utilisé comme soude concentrée.

d. Calcination de l'alumine :

L'aluminium hydraté, après séchage, subit une calcination dans les fours rotatifs à une température de 1200°C, on obtient de l'alumine avec une teneur en Al_2O_3 de 99,2 à 99,5 %.

e. Electrolyse de l'alumine :

Du fait de la grande affinité de l'aluminium pour l'oxygène, l'aluminium ne peut être réduit par les réducteurs habituels (C ou Co) et l'on a recours à l'électrolyse. La décomposition électrolytique de l'alumine, s'effectue dans un bain de cryolite Na_3AIF_6, à une température de 920 à 950°C. La cryolite pure, se fond à 1000°C, alors que l'alumine fond à 2000°C.

Durant l'électrolyse, la cryolite dissout de l'alumine, à cet effet on ajoute du Al_2F_3 pour la neutralisation des éléments alcalins accompagnant l'alumine, ainsi que pour avoir un électrolyte à caractère acide faible et enfin pour diminuer la température de fusion de l'électrolyte.

L'une des exigences envers la composition chimique de l'alumine est surtout la teneur de Fe_2O_3, qui doit être inférieur à 0,04 % et celle de SiO_2 < 0,3 %, car ces deux composés sont plus nobles que l'aluminium et peuvent être séparés avec l'aluminium durant l'électrolyse.

Ce qui diminue la pureté de l'alumine est l'électrolyse proprement dite, effectuée dans un four, (fig. 52), avec une masse en carbone jouant le rôle de cathode et fermant le fond du four à la partie supérieure, où sont placées les anodes (anodes précuites ou anodes continues).

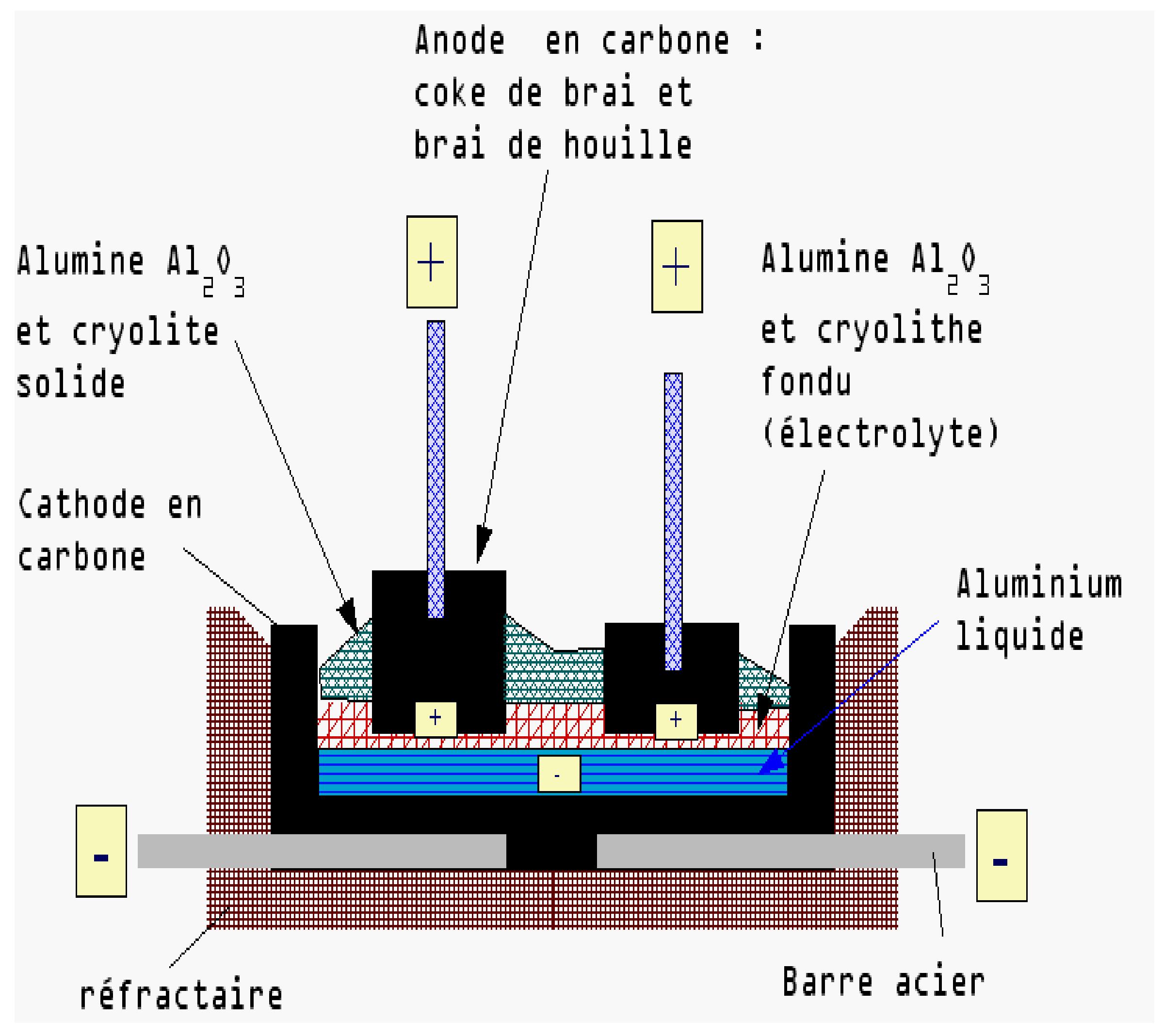


fig. 52

La tension de travail est de 4,5 volts et l'ampérage est de 30.000 à 100.000 Ampères. L'aluminium s'accumule sur le fond du four et forme pratiquement la cathode et de temps en temps, il est recueilli et coulé en lingots ou dans des mélangeurs. Pour l'élaboration d'une tonne d'aluminium, on a besoin de :

- 2000 kg d'alumine.
- 30 kg de cryolite.
- 30 kg de fluoride d'alumine.
- 550 kg d'anode en carbone.
- 15 à 20 MWH de charge électrique.

L'aluminium obtenu a une pureté de 99,2 à 99,9 % et les impuretés essentielles sont : Fe et Si et en faible quantité, Cu, Mg, Ti, Na.

Pour l'élaboration de l'aluminium pur a 99,99 %, il est nécessaire de procéder à une deuxième électrolyse. L'aluminium pur, possède une résistance chimique très élevée. Les alliages d'aluminium à grande résistance sont plaqués par de l'aluminium pur, afin de combiner la bonne résistance à la corrosion avec la résistance de l'alliage.

L'aluminium pur, peut avoir un éclat grâce aux différents procédés de trempage. L'oxydation anodique est le traitement superficiel le plus important pour l'aluminium. Il s'agit du renforcement du film d'oxyde naturel par la voie électrolytique, donc l'augmentation de l'action de protection contre la corrosion et l'amélioration de la dureté et du comportement contre l'usure. Dans le tableau ci-dessous est indiqué la composition chimique de l'aluminium pur selon TGL

Type	Quantité en %						
	Total	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Autres
Al 99,99 R	0,01	0,005	0,005	0,003	0,005	0,002	0,001
Al 99,95 R	0,05	0,025	0,020	0,015	0,005	0,005	0,005
Al 99,9 R	0,10	0,05	0,04	0,03	0,005	0,01	0,001
Al 99,8	0,20	0,12	0,10	0,01	0,04	0,03	0,01
Al 99,7	0,30	0,16	0,10	0,01	0,05	0,03	0,01

Al 99,5	0,50	0,40	0,16	0,02	0,06	0,03	0,01
Al 99,4	0,60	0,50	0,30	0,02	0,07	0,03	0,03
Al 99,0	1,00	0,60	0,40	0,02	0,08	0,03	0,04
E-Al	0,50	0,40	0,10	0,02	0,040	*	0,01

Remarques : *

$Ti + Mn + Cr + V \leq 0,03$

$Mn, V, Cr \leq 0,010$

3.3. Caractéristiques de l'aluminium

3.3.1. Caractéristiques physiques

- Température de fusion : 660°C.
- Point d'ébullition : 2060°C.
- Chaleur spécifique :
  - A 20°C : 0,214 cal/g°C
  - A 100°C : 0,223 cal/g°C
  - A 500°C : 0,266 cal/g°C
- Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
  - A 0°C : 0,50 cal/cm.s°C.
  - A 100°C : 0,51 cal/cm.s°C.
  - A 200°C : 0,52 cal/cm.s°C.
- Résistivité à l'état pur $2,63.10^{-8}$ Ω.m.
- Allongement linéaire : 20 à 100°C : 24. 10^{-6} /°C et jusqu'à 600°C : 28,5. 10^{-6} /°C.
- Densité (à 20°C) : 2,7 g/cm^{3}.
- Conductibilité électrique : (65% de celle du cuivre pour l'aluminium pur à 99,5 %). La conductibilité électrique de l'aluminium diminue lorsque les impuretés augmentent.

L'aluminium, grâce à sa résistivité, est surtout utilisé pour la fabrication de chaudière et d'ustensiles de cuisine. Lorsqu'il est poli, c'est un métal blanc et brillant et possède un grand pouvoir de réflexion, on l'utilise comme réflecteur pour chauffage et éclairage ou surface réfléchissante des miroirs de télescopes. La capacité de réflexion peut atteindre jusqu'a 90 %.

Un conducteur d'aluminium, comparé avec un autre en cuivre, peut avoir la même résistance, la moitié de son poids, mais 1,3 fois plus grand. Donc l'utilisation de l'aluminium dans l'électrotechnique est très limitée à cause du diamètre des conducteurs.

Les figures ci-dessous, montrent :

- **Figure 53 :** la dépendance de la conductibilité électrique en fonction de la température de recuit.
    - Courbe a : 0,13 % Si et 0,30 % Fe.
    - Courbe b : 0,12 % Si et 0,50 % Fe.
    - Courbe c : 0,64 % Si et 0,10 % Fe.

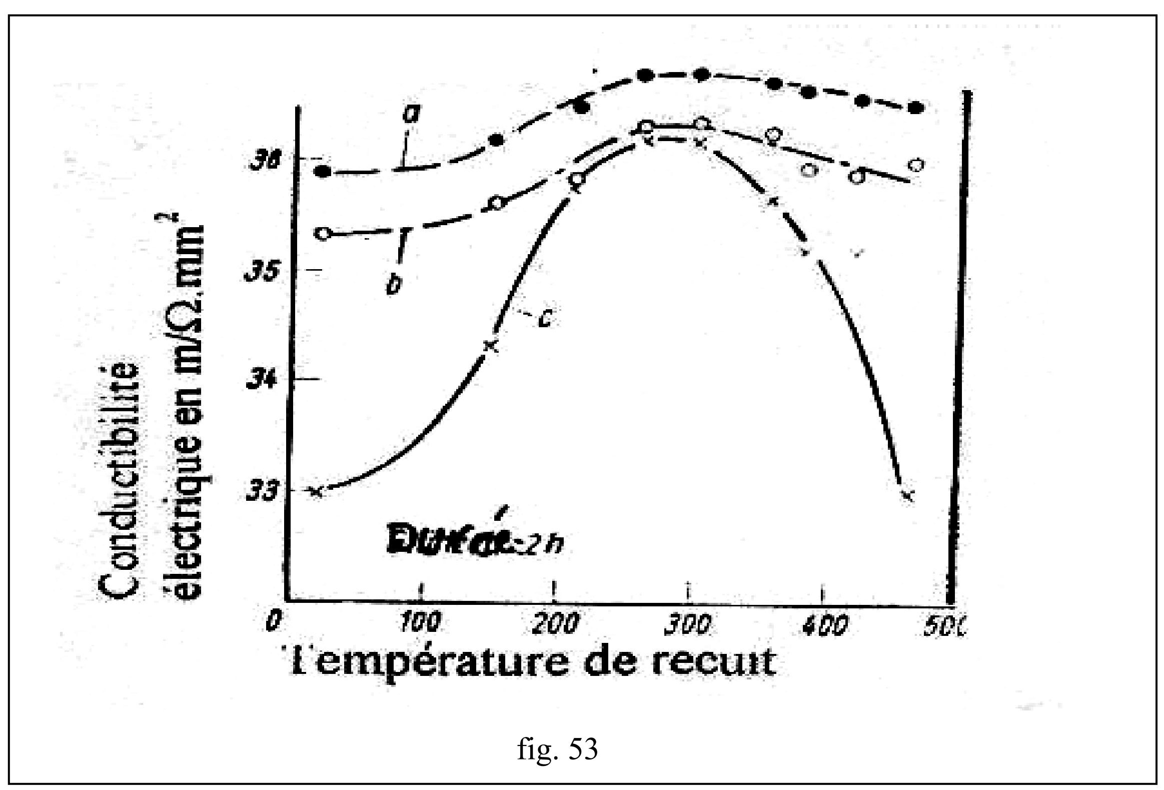


fig. 53

- **Figure 54 :** l'influence des différents éléments d'alliages, dissous dans les cristaux mixtes, sur la conductibilité spécifique de l'aluminium à T = 20°C.
- **Figure 55 :** l'influence du degré de pureté de l'aluminium sur la résistance spécifique électrique et sur la conductibilité électrique.

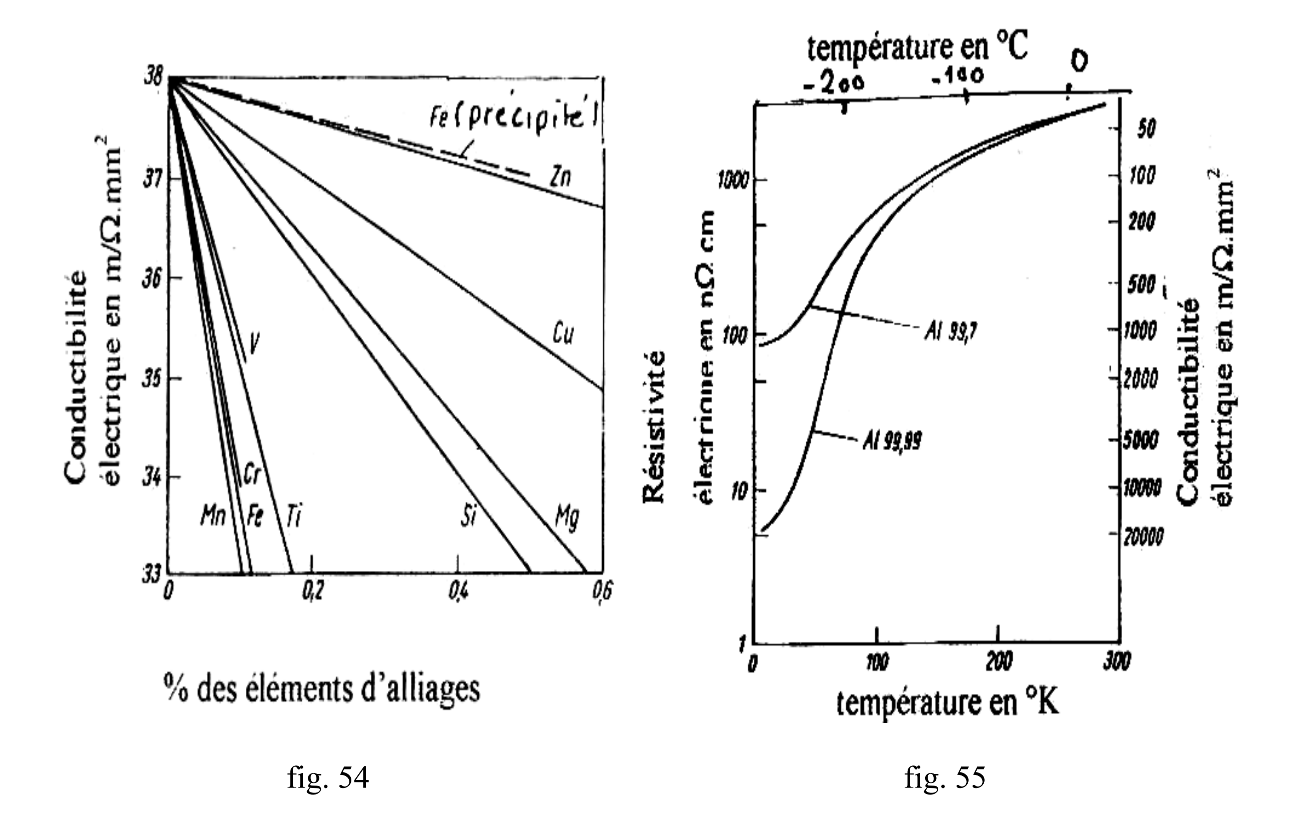


fig. 54 fig. 55

3.3.2. Caractéristiques mécaniques

A cause de sa structure du type CFC, l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile. Cette plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage étant mal aisé. L'aluminium se prête bien à toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tels que l'argon ou l'hélium (gaz de protection), sinon l'aluminium s'oxyde facilement et forme une pellicule de Al_2O_3.

Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique. Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent :

- Des traitements mécaniques (forgeage, laminage, etc.).
- Des traitements thermiques (trempe, recuit, etc.).
- Des éléments d'addition (Fe, Cu, Mn, Zn, Mg, Si).

A titre d'exemple :

- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (99,6 %) coulé sont :
  - R (résistance à la traction) = 70 à 100 N/mm².
  - $R_{0,002}$ (limite élastique) = 30 à 40 N/mm².

- A (allongement) = 15 à 25 %.
- HB (dureté brinell) = 15 à 25 HB.
- E (module d'élasticité) = 67500 N/mm².

- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (haute pureté) recuit :
  - R = 50 N/mm².
  - $R_{0,002}$ = 15 N/mm².
  - A = 50 %.
  - E = 71000 N/mm².

Une déformation plastique à froid de l'aluminium industriel augmente sa charge de rupture jusqu'à 150 N/mm² mais l'allongement baisse jusqu'à 6 %.

L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium à l'état de recristallisation (après un traitement thermique de 5 heures à 420°C) est montrée sur la figure 56.

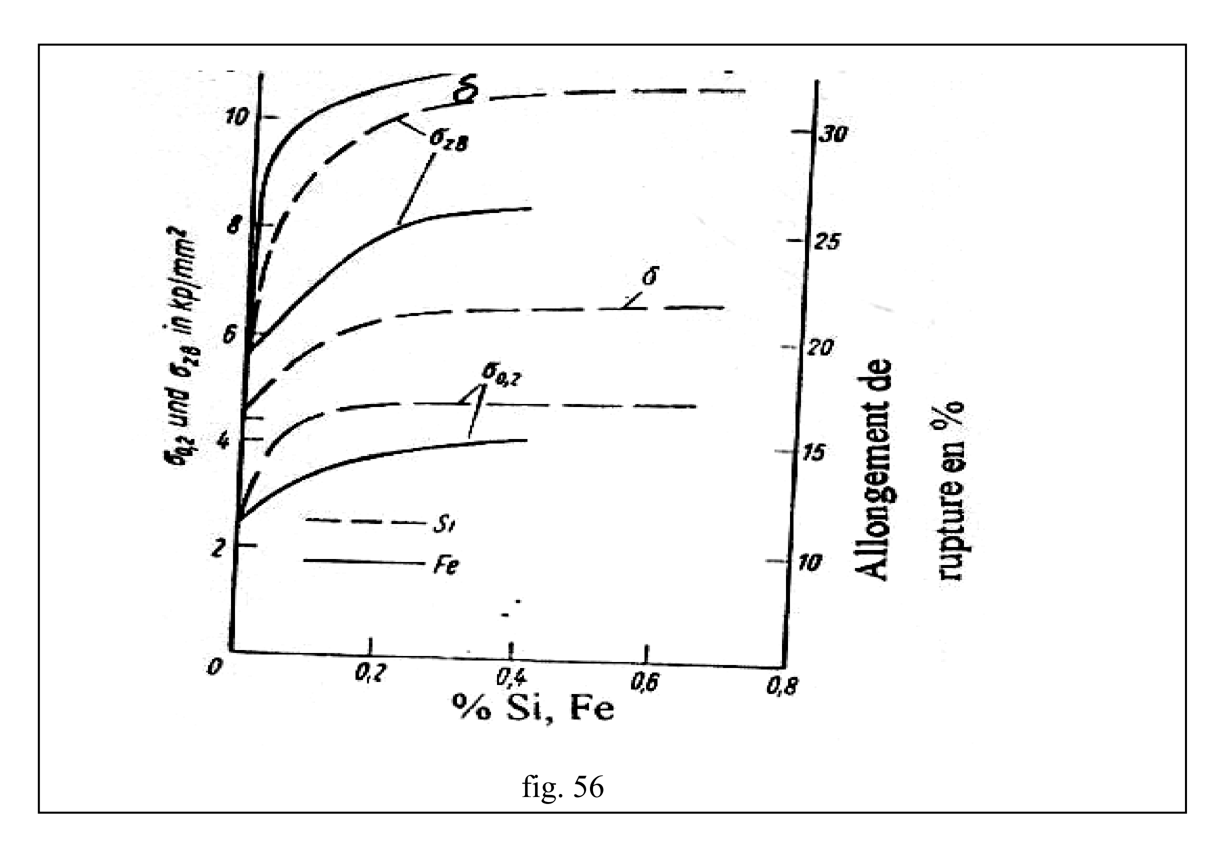


fig. 56

Le silicium augmente la limite d'élasticité et la résistance de l'aluminium plus que le fer. Tandis que le fer améliore l'allongement, cela est expliqué par la précipitation des particules fines et hétérogènes de AI_3Fe dans l'alliage binaire AI-Fe, qui seront transformés en grain fins lors du recuit de recristallisation.

Les grains fins donnent essentiellement une plasticité meilleure que celle des gros grains. Le fer stabilise la grosseur des gros grains de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques et surtout la valeur de l'allongement et celle de rupture. Le cuivre aussi améliore la résistance, tandis que le zinc et le magnésium, avec de petites concentrations, ne montrent aucun effet.

A cause de la faible résistance à l'état recuit d'adoucissement, les produits en aluminium pur et très pur subissent un durcissement à froid répété.

- Al 99,99 % : $\sigma_{0,2}$ = 15 à 25 N/mm² et σ_{ZB} = 40 à 60 N/mm².
- Al 99,5 % : $\sigma_{0,2}$ = 35 à 45 N/mm² et σ_{ZB} = 70 à 90 N/mm².

3.3.3. Tenue à la corrosion

Le phénomène de la tenue à la corrosion est expliqué par la formation d'une pellicule (≈ 0,7 µm) non soluble dans l'eau et protégeant le métal contre les milieux oxydants et une éventuelle attaque chimique. L'aluminium est très résistant conte l'influence atmosphérique et contre beaucoup de produits de l'industrie chimique et alimentaire.

Le tableau ci-dessous donne une idée sur la tenue de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages (sans couche de protection) pour les différents milieux.

Milieu	Al 99,5 %		Al Mg		Al Cu Mg	
Eau de mer	2	3	1	2	3	5
Viande	1		-		-	
glace	1		1		2	
Fréon	1		1		-	
Eau distillée	1	2	1	2	-	
Essence	1		1		1	3
Gasoil	1		1		1	
Plâtre	1	2	-		-	
Matériaux de construction	3	6	-		-	
Atmosphère et industrie	2	3	3	2	3	
Eau de fleuve	1	2	1		3	
Acétylène	1		-		2	3
Ammoniaque	1	2	1	2	-	
Alcool éthylique sans eau	5		-		-	
Alcool éthylique avec eau	1	2	-		-	
Ethane	1		1		-	
Produit alimentaire	1		-		-	

Légende		
1. Bon résistant	2. Résistant	3. Peu résistant
4. Encore utilisable	5. Presque résistant	6. Non résistant

3.4. Alliages d’aluminium

3.4.1. Influence des éléments d’alliages sur les propriétés de l’aluminium

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d’améliorer ces propriétés, on est conduit à ajouter les éléments d’addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, etc. Ces éléments entrent en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des composition d’alliages industriels. L'avantage des alliages d’aluminium est qu’ils permettent d’avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique.

a. Addition de Mg : Les alliages formés, possèdent une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, lorsque avec l’aluminium, il s’avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leur poli à cause de la haute résistance chimique.

b. Addition de (Mg + Mn) : Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l’emboutissage et au polissage.

c. Addition (le (Cu + Si) : Ce sont des alliages de fonderie, présentant une bonne coulabilité et conviennent surtout pour les pièces compliquées.

d. Addition de (Co + Ti + Zn) : Accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité, l’addition de Cu et de Zn facilite l’usinage.

e. Addition de (Mg + Zn + Cu) : Ils sont aptes aux traitements mécaniques et présentent une résistance mécanique maximum. La présence de cuivre les rend durcissables à chaud.

3.4.2. Traitements thermiques des alliages d’aluminium

Pour assurer le durcissement des alliages d’aluminium, a recourt à la trempe et au vieillissement. Les structures hors d’équilibre et les défauts de structure produits par la déformation qui dégradent la plasticité de l’alliage sont éliminés en appliquant le recuit.

3.4.2.1. Trempe et vieillissement

Avec l’abaissement de la température, la solubilité dans l’aluminium, de la plupart des composants, diminue, ce qui permet d’utiliser la trempe et le vieillissement pour durcir les alliages.

a. Trempe des alliages d’aluminium :

La trempe structurale des alliages d’aluminium a des buts et des effets totalement différents de la trempe martensitique des aciers. Le cycle thermique de ce traitement comprend :

- Le chauffage jusqu'à la température de dissolution totale ou partielle des phases intermétalliques en excès dans l'aluminium.
- Le maintien à cette température.
- Le refroidissement suffisamment rapide (hypertrempe) jusqu'à la température ambiante pour obtenir une solide sursaturée.
- Le maintient isotherme ultérieur qui conduit au durcissement de l'alliage. Celui-ci est réalisé, soit à la température ambiante (vieillissement naturel ou maturation), soit à une température supérieure (appelé vieillissement artificiel ou simplement vieillissement).

Pour mieux comprendre les mécanismes de durcissement structurel engendré par la trempe, prenons l'exemple de l'alliage Al 4 %-Cu. D'après le diagramme Al-Cu, (fig.149), la trempe des alliages AI-Cu est déterminée par la ligne abc qui passe au dessus de la ligne de solubilité limite des alliages contenant une teneur en cuivre < 5,6 % et au dessous de ligne eutectique (584°C) pour les alliages contenant une plus grande quantité de cuivre (> 5,6%).

Lors de la chauffe pour trempe des alliages titrant 5,6 % Cu, la phase excédentaire en Al_2 se dissout complètement et le refroidissement rapide ultérieur ne fixe que la solution solide α sursaturée qui contient autant de cuivre qu'il y a dans l'alliage. Pour une teneur en cuivre > 5,6 %, la structure des alliages après trempe, se composera de solution solide α sursaturée dont la composition correspond au point b et de cristaux de la combinaison $CuAl_2$ non dissoute au chauffage.

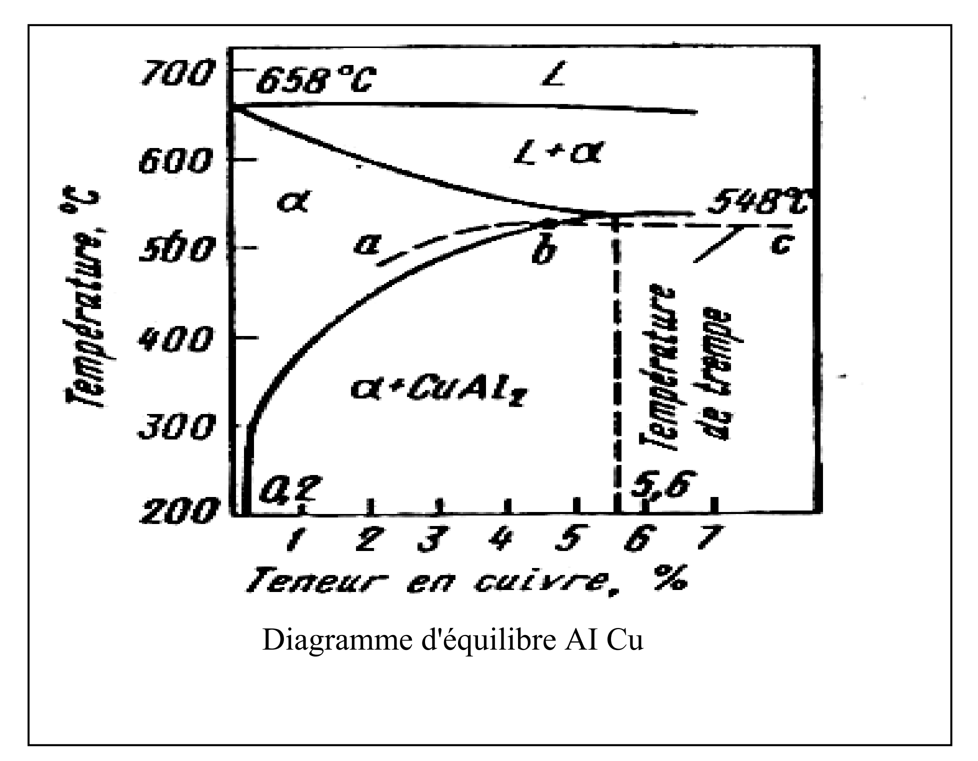


Diagramme d'équilibre AI Cu

fig. 57

La durée de séjour, à la température de trempe nécessaire pour la dissolution des phases intermétalliques, dépend de l'état structural de l'alliage, du type de four et de l'épaisseur de la pièce.

Exemple : pour des épaisseurs 0,5 à 150 mm, le temps de chauffage étant de :

- Fours de salpêtres : séjour de 10 à 80 min.
- Four électrique à circulation forcée d'air : séjour 30 à 210 min.
- **Pièces moulées : 2 à 15 heures.**

Après la trempe, les alliages de forge sont refroidis à l'eau froide et les moulages de forme à l'eau portée de 50 à 100°C, pour éliminer le gauchissement et la formation de tapures. Après la trempe, les alliages, tout en possédant une faible résistance (R, $R_{0,002}$), acquièrent une élasticité élevée (A, Z).

b. Vieillissement des alliages trempés :

La trempe est suivie d'un vieillissement qui représente est un maintient à l'ambiante pendant quelques jours (maturation) ou un maintient pendant 10 à 24 heures à une température accrue (vieillissement artificiel ou par revenu). Le vieillissement s'accompagne de décomposition de la solution solide sursaturée qui va de pair avec le durcissement de l'alliage.

Si la distribution des atomes de cuivre dans le réseau de l'alliage est statiquement uniforme, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et de la durée du vieillissement.

Le vieillissement naturel (maturation à 20°C) ou artificiel (durcissement par le revenu à basses températures, inférieures à 100 ou 150°C), ne révèle pas la décomposition de la solution solide avec isolation de la phase en excès à ces températures. Les atomes de cuivre se déplacent seulement à l'intérieur du réseau cristallin de la solution solide α à de très faibles distances et s'accumulent suivant les plans {l00} en agrégats bidimensionnels lamellaires ou disques dits zones de **GUINIER-PRESTON (GP1)** comme le montre la figure 58.

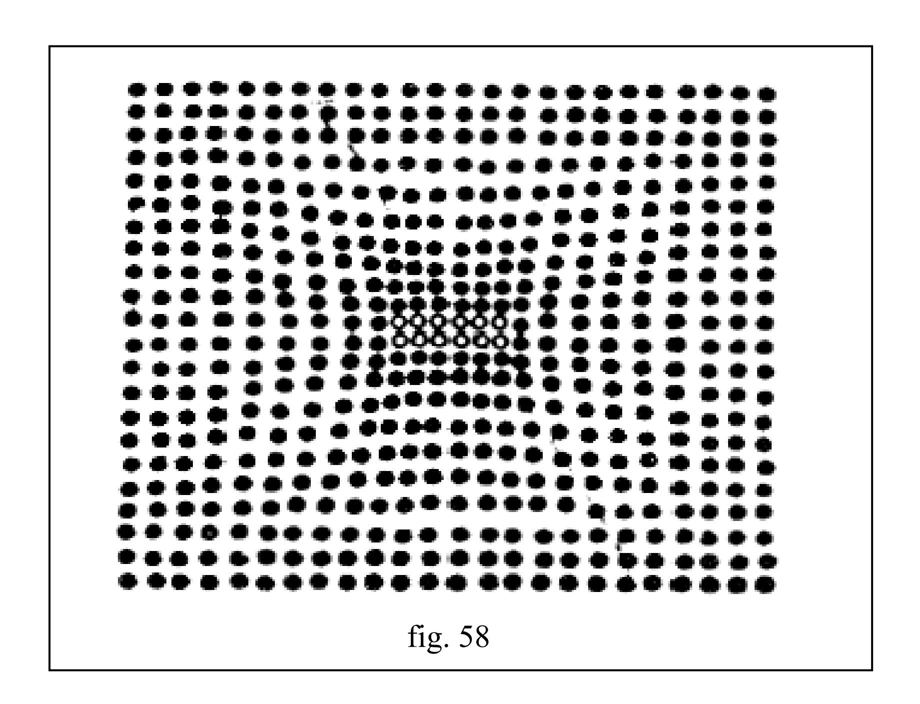


fig. 58

Au sein de chaque cristal, ces zones longues de quelques dizaines d'angströms (30 à 60 Å) et de 5 à 10 Å d'épaisseur se repartissent plus ou moins régulièrement. La concentration du cuivre dans les zones GP1 est plus faible que dans $CuAl_2$ (54 %).

En portant l'alliage après maturation en quelques secondes ou minutes à 230 ou 270°C et en le refroidissant rapidement, on supprime totalement le durcissement et l'alliage acquiert à nouveau les propriétés qu'il avait directement après trempe. Ce phénomène a reçu le nom de restauration. L'adoucissement à la restauration est du au fait qu'à ces températures, les zones GP1 sont instables et c'est pourquoi elles se dissolvent dans la solution solide, alors que les atomes de cuivre se redistribuent de nouveau plus ou moins régulièrement dans le volume de chaque cristal de la solution solide, tout comme après la trempe.

Le maintient ultérieur de l'alliage à l'ambiante, conduit à nouveau à la formation des zones GP1 et à son durcissement. Pourtant après la restauration et le vieillissement qui la suit, les propriétés anticorrosives de l'alliage se dégradent, ce qui rend plus difficile l'utilisation de la restauration dans des buts pratiques.

Le séjour durable à 100°C, ou pendant quelques heures à 150°C, conduit a la formation des grandes zones de Guinier Preston GP2, (fig.59) (10 à 40 Å d'épaisseur et 20 à 300 Å de diamètre) avec une structure ordonnée différente de celle de la solution solde α.

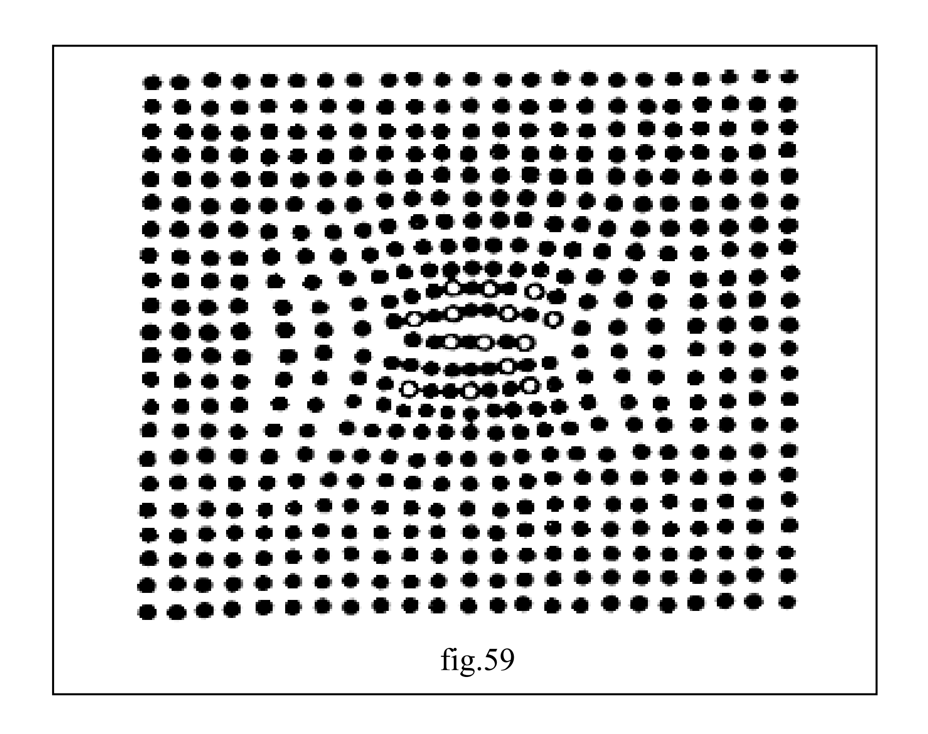


fig.59

La concentration du cuivre dans ces zones correspond à la teneur dans $CuAl_2$. Avec l'augmentation de la température de vieillissement, le processus de diffusion, transformations structurales ainsi que le durcissement lui même, deviennent plus rapides. Le maintient pendant plusieurs heures aux températures 150 à 200°C, conduit au droit des zones GP2, à la formation de particules dispersées (lamelles fines) de la phase θ' intermédiaire dont la composition chimique ($CuAl_2$) alors que son réseau cristallin est différent, (fig.60).

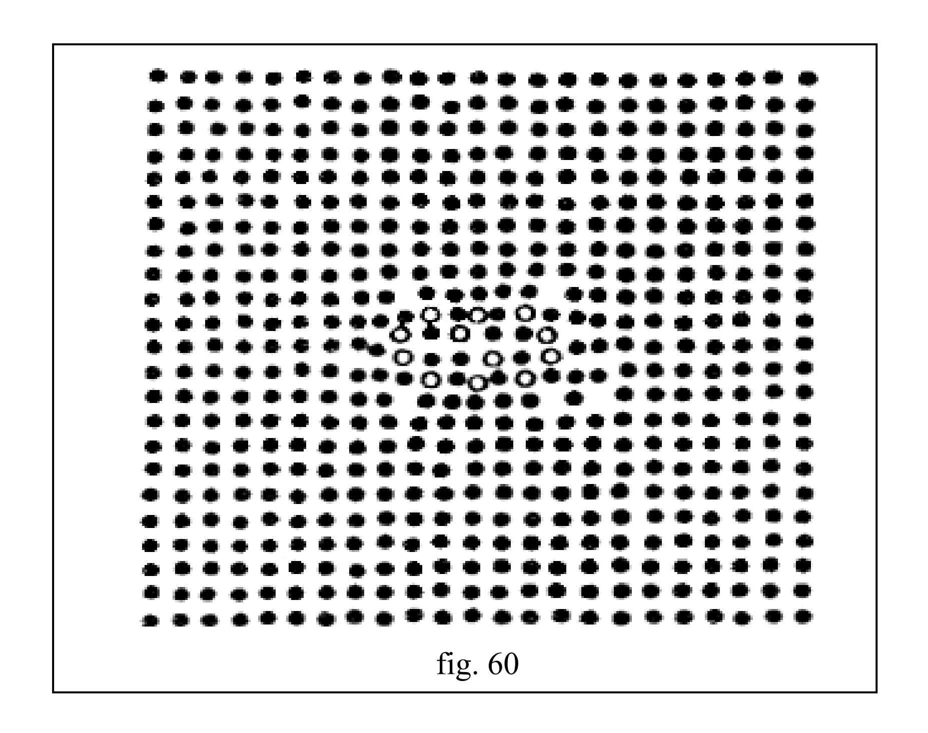


fig. 60

La phase θ est liée par cohésion à la solution solide (fig.61) ; L'augmentation de la température jusqu'à 200 à 250°C, provoque la coalescence de la phase métastable et la formation de la phase stable, de la sorte, la maturation ne donne lieu qu'à la formation des zones GP1. Dans le cas du vieillissement par revenu, la succession des transformations structurales peut être schématisée de la forme suivante.

GP1 → GP2 → θ' – θ ($CuAl_2$)

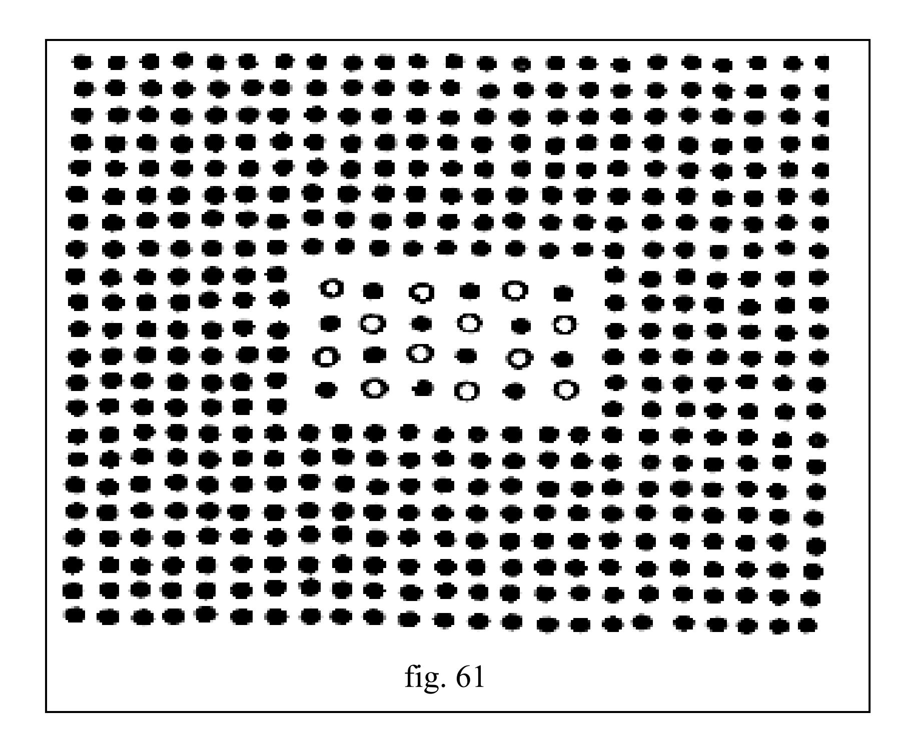


fig. 61

Cela ne signifie, pourtant pas qu'une formation se transforme « sur place » en une autre. Il se peut que l'apparition de la formation ou de la phase successive se produit après dissolution de la formation initiale.Le meilleur durcissement des alliages s'obtient avec les alliages $MgZn_2$, Mg_2Si et la phase S (Al_2CuMg) de structure complexe et de composition différente de celle de la solution solide α.

3.4.2.2. Recuit des alliages d'aluminium

Ses modalités sont :

- Recuit d'homogénéisation.
- Recuit de recristallisation.

- Recuit d'adoucissement (après trempe et vieillissement préalable)

a. Recuit d'homogénéisation

Ce traitement est appliqué aux lingots avant corroyage pour éliminer la ségrégation deudutique qui conduit à la formation d'une solution solide inhomogène et au dépôt des inclusions eutectiques fragiles hors d'équilibre $CuAI_2$, $A1_2CuMg$ (phase 5), Mg_2Si, $Al_2Mg_3Zn_3$ (phase T), etc... aux joints des grains et entre les branches de dendrites, (fig.62).

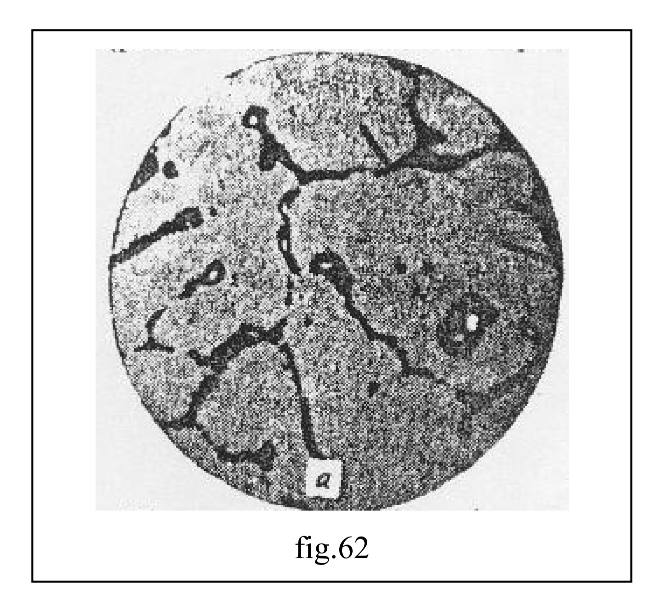


fig.62

Au cours de l'homogénéisation, la composition des cristallites de la solution solide est uniformisée, alors que les combinaisons intermétalliques se déposent sous forme de fines inclusions secondaires uniformément réparties, (fig. 63)

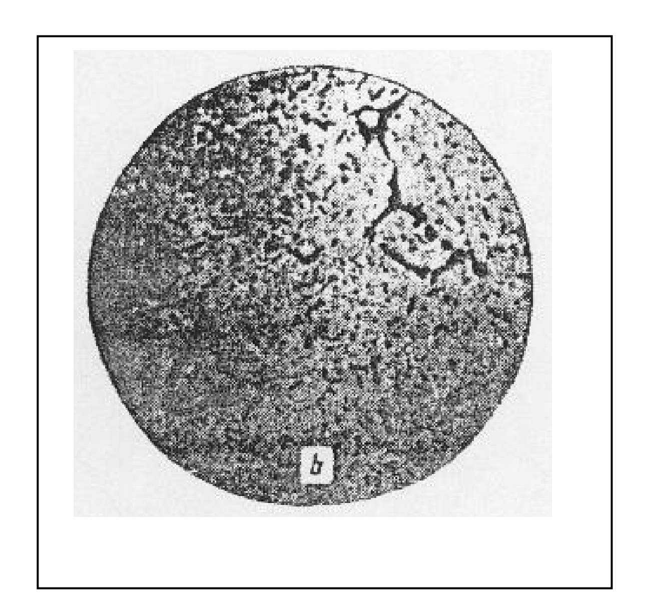


fig. 63

Il s'ensuit que la plasticité de l'alliage coulé s'améliore, ce qui permet d'augmenter le degré de corroyage lors du formage à chaud, la vitesse de filage et diminuer les rebuts technologiques.
L'homogénéisation contribue à l'obtention d'une structure à grains fins dans les tôles recuites et diminue l'aptitude à la corrosion sous tension. Le cycle thermique de ce recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température élevée de 450 à 520°C.
- Un maintient qui varie de 4 à 40 heures.
- Un refroidissement lent ou dans le four.

b. Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation consiste à chauffer l'alliage déformé jusqu'aux températures supérieures à celles de la fin de recristallisation primaire. On l'applique pour supprimer l'écrouissage et obtenir un grain fin. Dans la plupart des alliages d'aluminium, lorsque la déformation atteint 50 à 75 %, la température de début de recristallisation s'échelonne de 290 à 400°C. La température de recuit de recristallisation varie suivant la composition de l'alliage de 350 à 500°C et le maintient de 0,5 à 2,0 heures.

Après le recuit de recristallisation des alliages non durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement est choisie arbitrairement. Pour les alliages durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement allant jusqu'à 200 à 250°C doit être inférieure ou égale à 30°C/h. Le recuit comme opération intermédiaire est appliqué dans le travail à froid ou entre le corroyage à chaud et à froid.

Le recuit incomplet est une modalité de recuit de recristallisation. Il permet d'obtenir des propriétés intermédiaires entre l'état écroui et recristallisé. Dans ce cas, la température de recuit doit être inférieure à celle de la fin de recristallisation pour assurer l'obtention d'une structure sous forme de polygone, ou partiellement recristallisée, qui supprime en partie l'écrouissage. Le plus souvent, le recuit est appliqué dans le cas des alliages de forge et de laminage non soumis au durcissement per trempe et vieillissement.

c. Recuit d'adoucissement des alliages ayant subi la trempe et le vieillissement

Il est effectué à une température de 350 à 450°C avec un séjour de 1 à 2 h. Ces températures assurent la décomposition complète de la solution solide sursaturée et la

coalescence des phases qui durcissent. La vitesse de refroidissement ne doit pas dépasser 30°C/h. Après le recuit, l'alliage possède une faible charge de rupture, une plasticité suffisante et une résistance élevée à la corrosion sous tension.

3.4.3. Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

a. Résistance à chaud : D'une certaine manière, on peut dire que la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C.

b. Résistance aux basses températures : Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles d'où leur application en cryogénie.

c. Résistance à la fatigue : De manière générale, le coefficient d'endurance Rm est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempants et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempants.

d. Résistance à la corrosion : Comme pour l'aluminium pur; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule de Al_2O_3. La protection anti-corrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition.

- Corrosion galvanique à craindre en présence du fer.
- Corrosion de type intergranulaire et sous tension, à craindre en présence d'additions telles que Cu, Mn, Mg + Si et Mg + Zn

e. Mise en forme : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminer et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud.

f. Soudage : De manière générale, le soudage est facile grâce à la couche protectrice d'alumine (procédés de soudage sous gaz protecteur TIG ou sous vide).

3.4.4. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques $CuAl_2$, (phase θ), Mg_2Si, Al_2CuMg (phase S), Al_6CuMg_4 (phase T). Al_3Mg_2, $Al_3Mg_3Zn_3$ (phase T) Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

1. Alliages corroyés : destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres. Profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de

forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.

2. Alliages de fonderies : prévus pour le moulage des formes.

3. Alliages frittés : élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

3.4.4.1. Alliages corroyés avec et sans durcissement structural

Ils sont obtenus, fondus dans des fours à induction, car grâce au mouvement du bain induit qu'on obtient un mélange homogène, c'est à dire, une répartition homogène des éléments d'addition.

Le magnésium et le zinc, possèdant pratiquement un point de fusion inférieur à celui de l'alliage d'aluminium de 750°C, sont ajoutés sous forme de métaux, cependant le Cu, Si, Mn sont introduits sous forme d'alliages, car ils possèdent un point de fusion inférieur à 750°C.

Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique, les alliages corroyés sont classés en deux types :

- Alliages sans durcissement structural (non trempants).
- Alliages avec durcissement structural (trempants).

A. Alliages sans durcissement structural

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que Al-Mn, AI-Mg, Al-Mg-Mn (alliages de forge et d'estampage). Leur durcissement naturel est du à la formation d'une solution solide et dans une moindre mesure aux phases en excès.

Leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques sont données sur le tableau ci-dessous selon la norme GOST.

Nuance	Composition chimique (%)		Propriétés mécaniques		
	Mn	Mg	R (kgf/mm²)	$R_{0,002}$ (kgf/mm²)	A (%)
AMII	1,0 à 1,6	-	13 (17)	5 (13)	23 (10)
AMr2	0,2 à 0,6	1,8 à 2,8	20 (25)	10 (20)	23 (10)
AMr3	0,3 à 0,6	3,2 à 3,8	22	11	20

AMr5	**0,3 à 0,6**	**4,8 à 5,8**	**30**	**15**	**20**
AMr6	**0,5 à 0,8**	**5,8 à 6,8**	**30 (40)**	**15 (30)**	**18 (10)**

Ces types d'alliages se présentent bien au travail à froid (estampage, cuitrage, etc.), au soudage et possèdent une tenue à la corrosion élevée. La limite élastique et la résistance à la traction augmentent et l'allongement diminue. Au delà de la température de 150°C, le long séjour conduit à la diminution de la résistance.

Un recuit de recristallisation entre 350 à 450°C peut produire un retour à l'état doux. Pour obtenir une structure à grains fins lors de la recristallisation, il est exige au préalable une déformation allant jusqu'à 50 %. Leur usinage à l'état recuit est très difficile.

a. Alliage Al-Mn

La teneur en manganèse est de 1,0 à 1,6 %. La résistance à la traction est supérieure que celle de l'aluminium pur, malgré que les propriétés de déformation sont identiques. La tenus à la corrosion est aussi meilleure que celle de l'aluminium pur. Une meilleure usinabilité peut être obtenue grâce à l'addition de magnésium (0,2 à 0,3) %, de titane ou de chrome. Le manganèse augmente aussi la température de recristallisation, l'addition d'une faible teneur en Mn permet d'augmenter nettement la résistance mécanique des alliages.

L'alliage Al-Mn est une solution solide de manganèse dans l'aluminium qui comporte également une faible quantité de particules de la combinaison Al_6Mn, voir diagramme d'équilibre partiel Al-Mn, (fig.64). Ils sont utilisés pour les toitures, coffrages, revêtements, réservoirs, ustensiles de cuisine, etc.

Caractéristiques des nuances 3003 et 3004 à l'état recuit.

Nuances	Composition	Rm (MPa)	A (%)
A – MI 3003	(1 à 1,5) % Mn (0,05 à 0,2) % Cu	100 à 130	25

A – MIG 3004	(1 à 1,5) % Mn < 0,25 % Cu	120 à 160	22

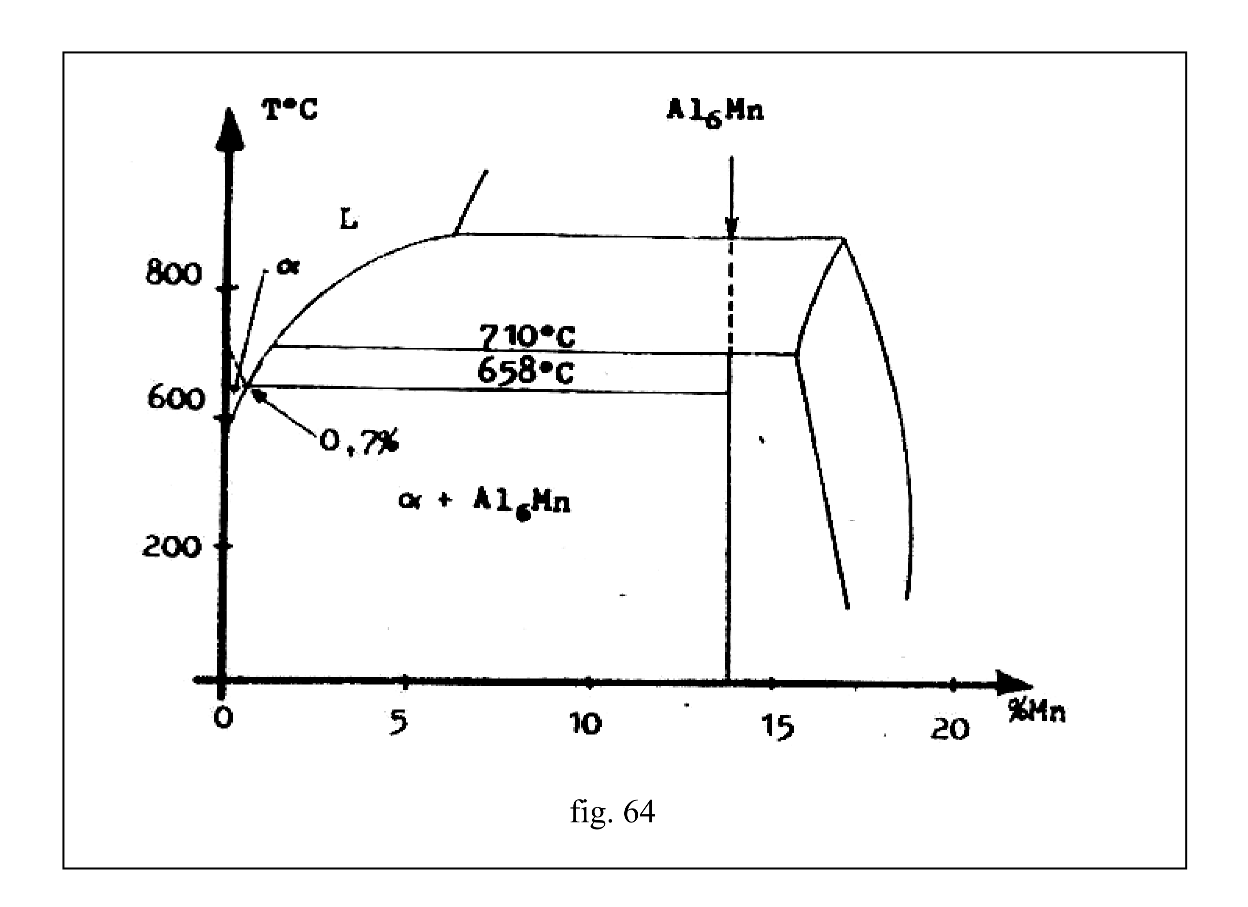


fig. 64

b. Alliage Al-Mg

A ce groupe appartiennent les alliages avec une teneur en magnésium de 0,2 à 7,2 % et une teneur en Mn de 0,2 à 0,8 %. Ces alliages sont caractérisés par une résistance (stabilité) élevée contre l'eau salée. Les alliages avec une teneur en Mn jusqu'a 5 % s'adaptent bien à l'oxydation anodique à cause de leur structure fine et homogène. Les alliages avec une teneur > 5 % en Mn se laissent difficilement travailler et posent des problèmes aux soudages et s'inclinent devant la corrosion intercristalline et sous tension. Les alliages à 7 % Mn sont caractérisés par de bonnes propriétés de surface.

A l'état d'équilibre, après refroidissement, les alliages Al-Mg sont biphasés α + β, (Al_3Mg_2). Pourtant la haute stabilité de la solution solide et la faible vitesse de diffusion du Magnésium

dans l'aluminium font que même, après refroidissement lent, ils ne contiennent pas de phase excédentaire et se composent d'équilibre partiel Al-Mg, (fig.65).

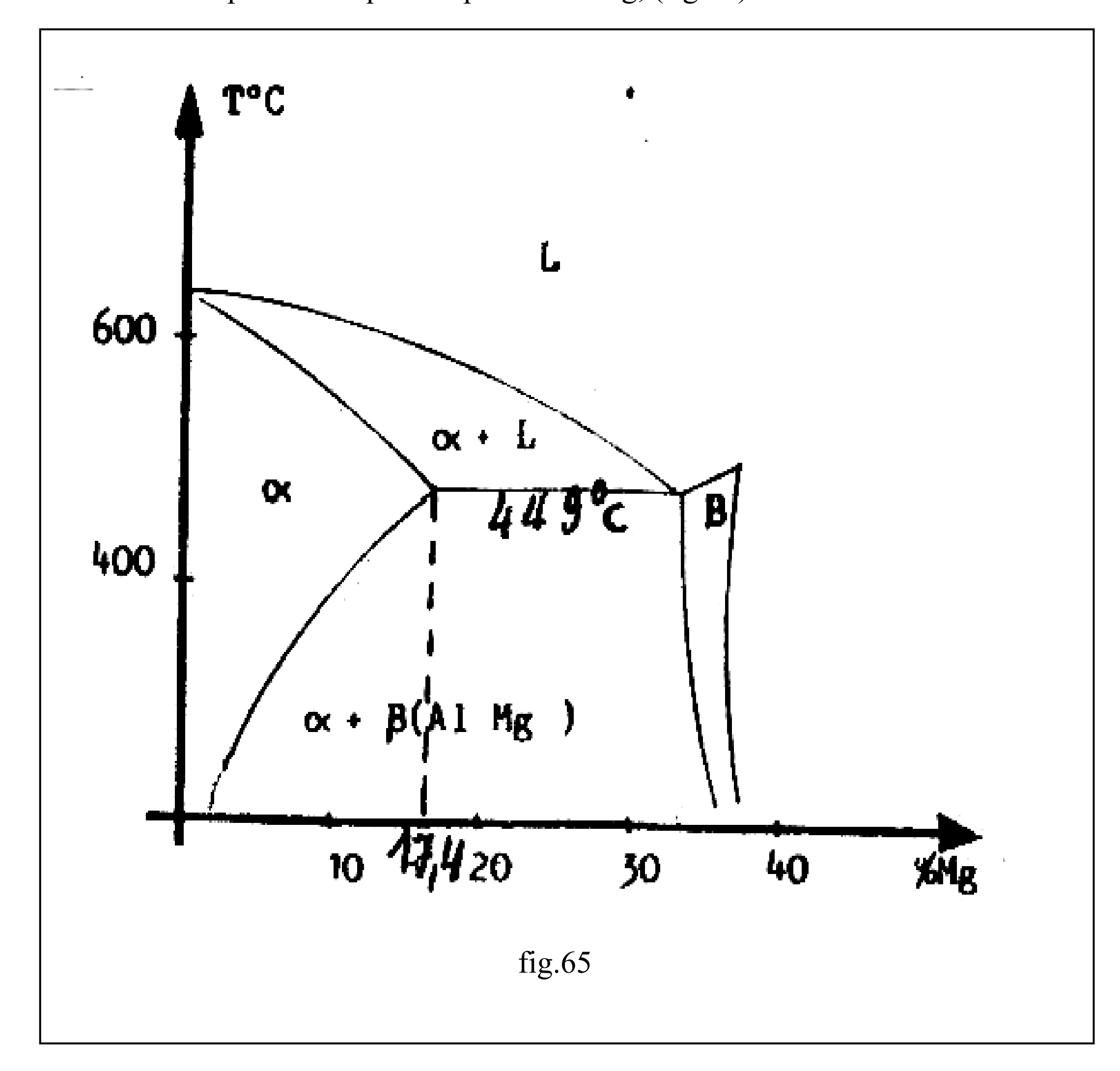


fig.65

Quand les alliages Al-Mg sont à l'état d'équilibre, la solubilité du magnésium dans la phase α est d'environ 15 % à 450°C mais elle se réduit jusqu'à 2 % à la température ambiante.

A basse température, la précipitation de la phase β ne donne pas un durcissement structural appréciable. Les alliages Al-Mg sont en général limités à 5 % Mg en raison des difficultés de mise en œuvre et de transformation. La variation des propriétés mécaniques de l'aluminium en fonction de la teneur en Mg est donnée sur la figure 66.

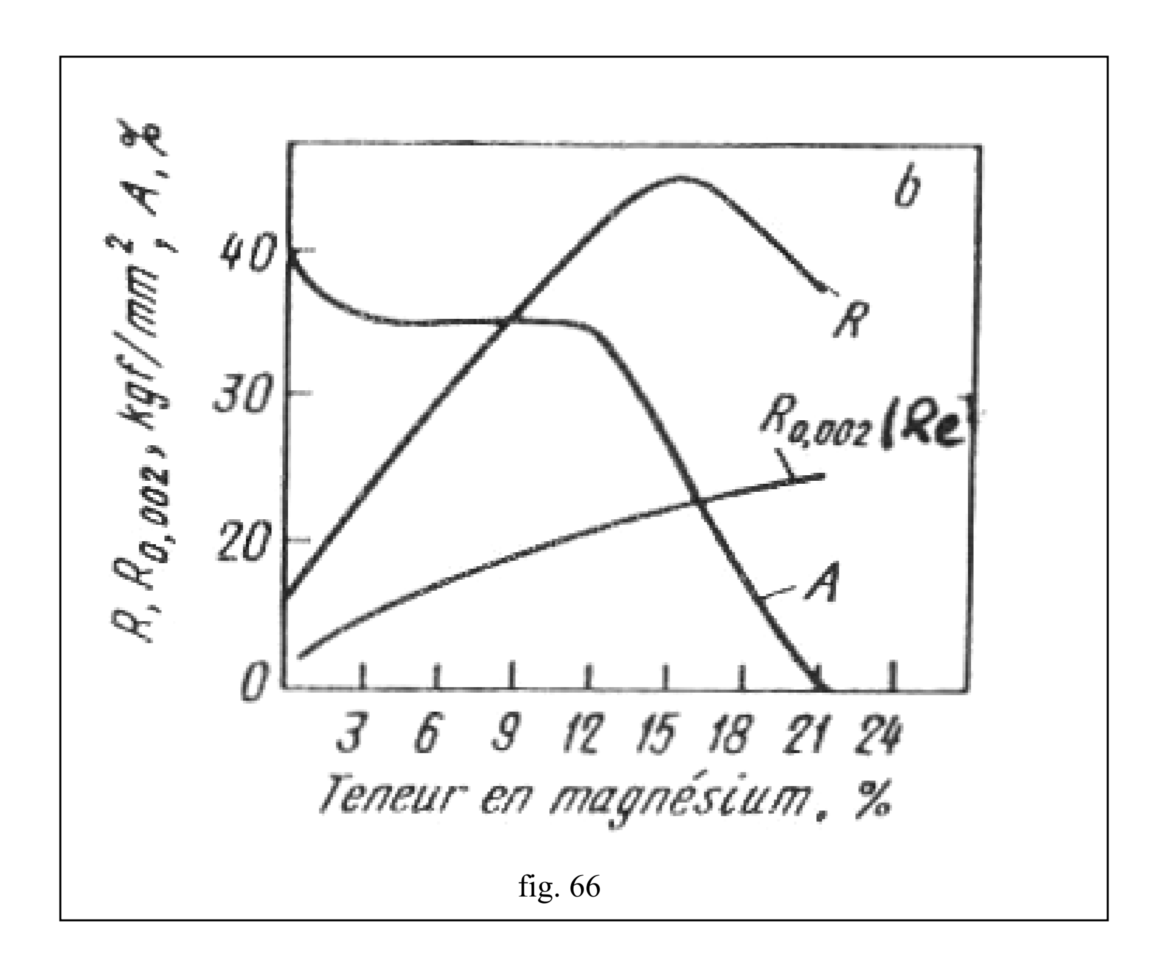


fig. 66

Le magnésium accroît fortement la résistance à la rupture jusqu'à 15 %, accroît moyennement la limite élastique et réduit brutalement l'allongement au delà de 12% Mg. Les alliages AI-Mg sont utilisés dans l'industrie automobile, aviation, navales, et pour des buts décoratifs.

c. Alliage Al-Mg-Mn

Ces alliages contiennent de 1,6 à 2,5 % Mg et de 0,5 à 1,5 % Mn. Ils possèdent une excellente résistance contre l'eau salée. L'addition d'une faible quantité de chrome (0,2 à 0,5) % peut éviter les difficultés qui se posent lors du travail du métal, la formation d'une structure à gros grains et la formations des fissures de soudage. Ces types d'alliages sont utilisés surtout dans la construction navale, l'aviation, dans l'industrie chimique et alimentaire.

B. Alliages avec durcissement structural (alliages de forge et de laminage)

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand Alfred Wilhr dans le système Al-Cu-Mg. Il est très connu aujourd'hui pour plusieurs alliages. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau.

Les différents alliages d'aluminium destinés au durcissement sont : AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu, leur composition chimique est indiquée sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'éléments d'admixtion						
	Mg	Si	Cu	Mn	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	autres
AlMgSi0,5	0,4 à 0,9	0,3 à 0,7	-	-	-	0,05	0,10	0,4	0,2	0,2	0,05
AlMgSi 1	0,7 à 1,5	0,7 à 1,5	-	0,05 à 1	-	0,10	-	0,5	0,2	0,2	0,05
AlCu4Mg1	0,4 à 1,1	0,2 à 0,7	3,5 à 4,8	0,4 à 1,0	-	-	-	0,7	0,3	0,2	0,05
AlCu4Mg2	1,2 à 1,8	-	3,9 à 4,8	0,4 à 1,1	0,5	-	-	0,5	0,3	0,2	0,05
AlCu3Mg	0,6 à 1,3	-	2,8 à 3,5	0,3 à 1,0	0,6	-	-	0,7	0,6	0,2	0,05
AlZnMgCu0,5	2,4 à 3,8	-	0,4 à 1,0	0,1 à 0,6	0,5	-	-	0,5	-	0,1	0,05

En plus Cr : 0,1 à 0,3 %.

Dans le passé, on utilisait surtout les alliages à haute résistance, tels que AlCuMg et AlZnCu, avec une limite de rupture > 400 N/mm^2, surtout dans le domaine de l'aviation, mais au cours des dernières années, il s'est développée la production de l'alliage AlMgSi avec une résistance moyenne utilisée surtout pour les produits pressés. Techniquement on utilise aussi le durcissement pour CuCr, CuZr, CuCrZr, CuBe, PbCaNa, etc. et même pour les aciers alliés.

Conditions pour le durcissement d’un alliage

- La diminution de la température décroissance de la solubilité des éléments d’alliages dans le métal de base.
- Il existe des cristaux mixtes homogènes à haute température qui doivent être surfusionnés à la température ambiante. Donc il n'est pas permis pendant le refroidissement brusque à leur décomposition en phase équilibrée.
- Une troisième condition plus importante c’est que le système en question doit accepter d’être durci. Il y a une série d’alliages qui remplissent les deux conditions, mais ne montrent aucun durcissement.

Un alliage d’Al-Cu avec 4 % Cu, avec recuit d’homogénéisation à 500°C, ensuite à partir de cette température, il est refroidi à l’eau (refroidissement brusque), cet alliage montre une augmentation de la dureté jusqu’à un certain niveau (plateau), ensuite de nouveau jusqu'au maximum, après dépassement du maximum, elle chute, (fig. 67). La première augmentation de la dureté jusqu'au plateau est désignée comme durcissement à froid, la seconde comme durcissement à chaud.

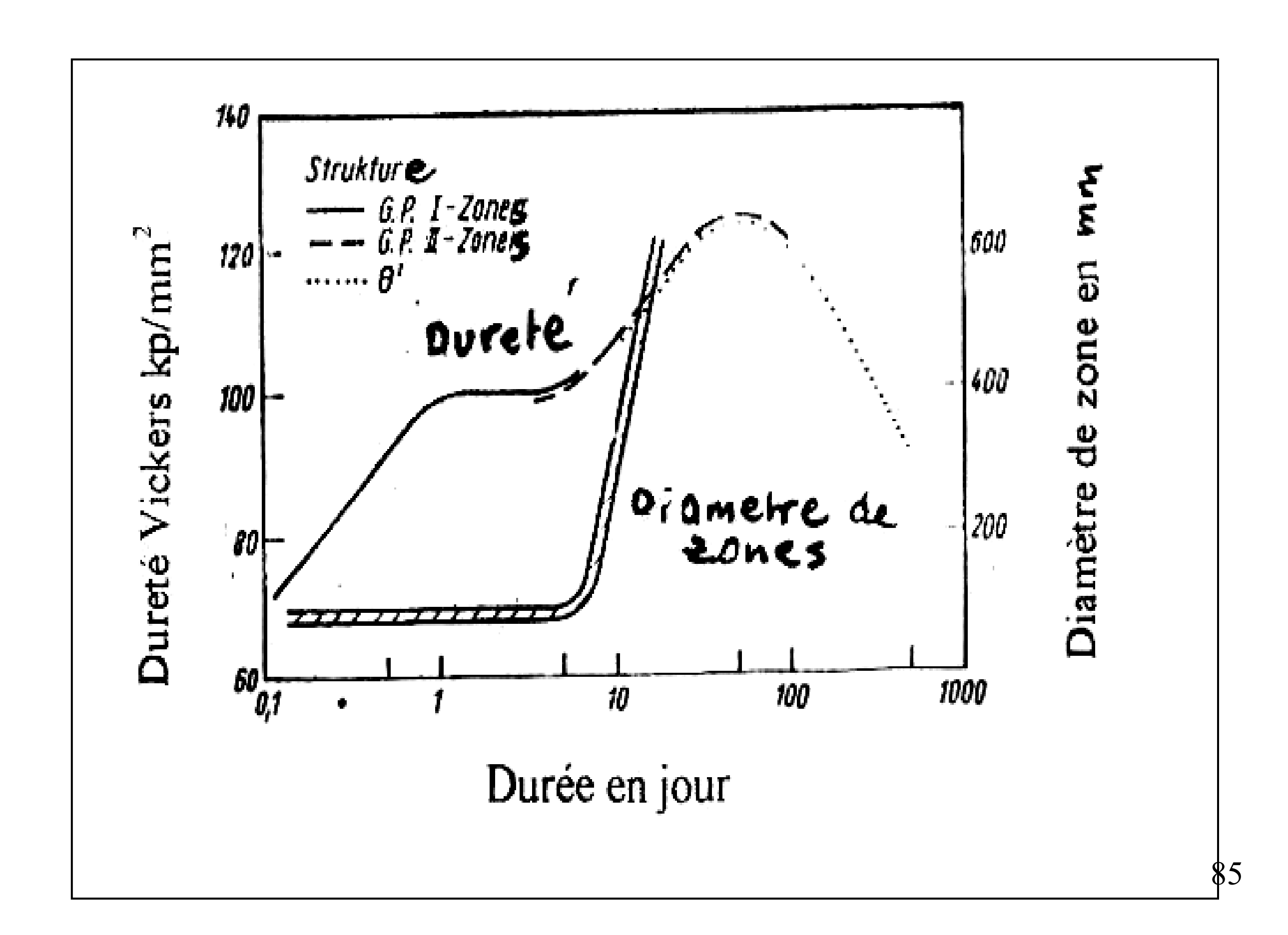


fig.67

A partir de ce processus, on peut expliquer un tel phénomène. Par le recuit à 500°C, les atomes de cuivre sont statiquement répartis dans le réseau cristallin de l'aluminium. Si on refroidit brusquement, à partir de cette température, les cristaux mixtes ne se décomposent pas et la répartition atomique reste conservée, mais avec le temps, les atomes de cuivre se rassemblent par le processus de diffusion dans le réseau d'aluminium.

Dans les zones de couches à atome unique, l'allongement de la surface provoque des tensions internes dans le réseau, ces dernières présentent à l'extérieur une augmentation de la résistance et de la dureté du matériau.Le processus de durcissement n'est pas très clair pour la majorité des alliages à part l'alliage AI-Cu-Mg. Donc on comprend par traitement de durcissement, un recuit d'homogénéisation suivi par un refroidissement brusque (à l'eau) aux températures ambiantes ou élevées. Techniquement on distingue le durcissement à froid ou à chaud :

- Le durcissement à froid est un traitement de durcissement avec vieillissement à température ambiante.
- Le durcissement à chaud s'effectue à température élevée

a. Alliage Al-Cu-Mg

Les alliages Al-Cu-Mg sont des alliages à hautes résistance mécanique, ils contiennent environ 2 à 4,9 % Cu, 0,2 à 1,8 Mg, 0,2 à 1,1 Mn et dans certains cas, 0,2 à 0,6 % Si et sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu.

Ils présentent une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faibles à cause de la teneur élevée en Cu, à cet effet ces types d'alliages sont toujours plaqués avec de l'aluminium pur. Les propriétés mécaniques de l'aluminium et de ses alliages ne peuvent atteindre celles des aciers, mais on essaie toujours de trouver un traitement thermique convenable pour l'amélioration des propriétés mécaniques.

En 1906, l'allemand Alfred Wilm a réussi après plusieurs années de recherches, d'améliorer la dureté et la résistance de l'alliage AI-Cu-Mg par durcissement structural et un brevet d'invention a été déposé sous le nom de ''Duralumin''.

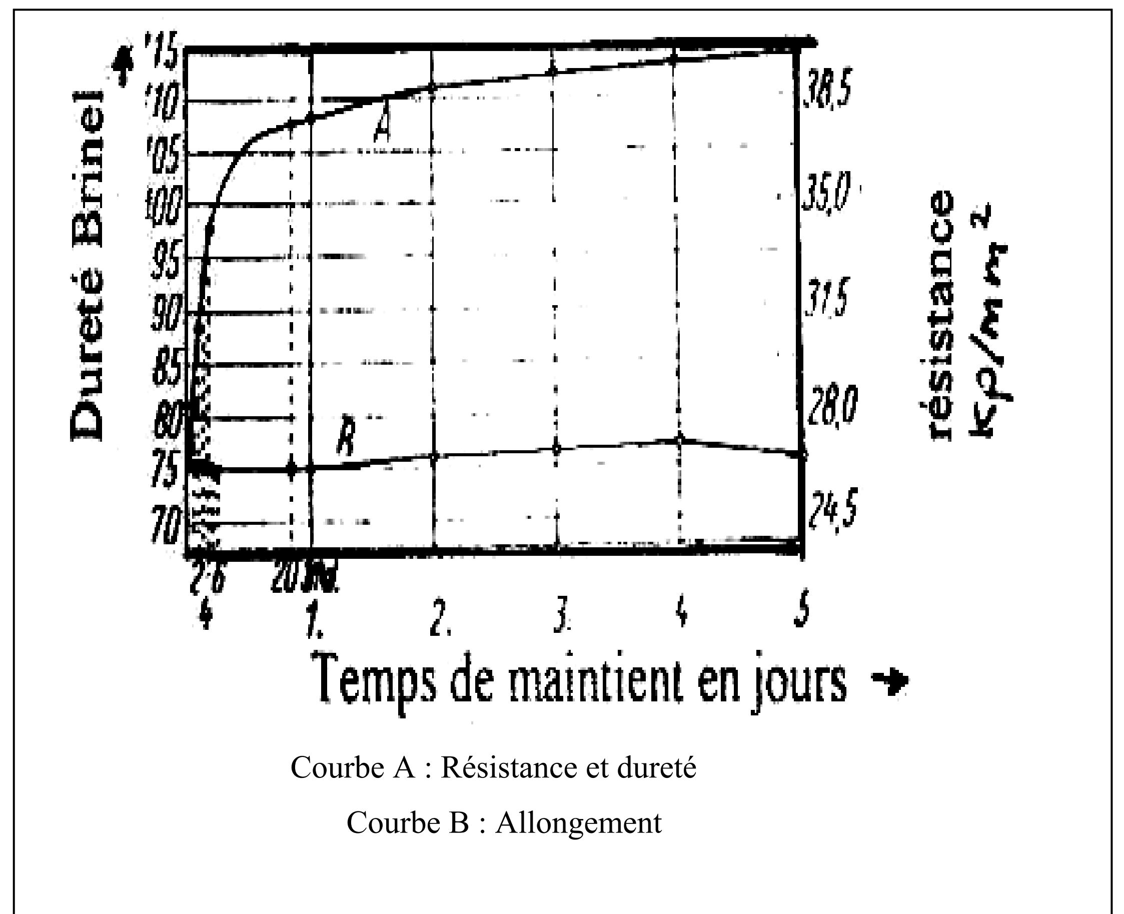
Donc on peut améliorer la dureté et les propriétés mécaniques (résistance à la rupture) d'un alliage d'AI-Cu-Mg. avec la composition chimique de 4,2 % Cu, 0,52 % Mg, 0,6 % Mn et le reste Al avec des inclusions (Fe, Si, etc.), bien que le manganèse ne fait pas partie des phases durcissantes, sa présence dans les alliages est utile. Il améliore la tenue du Duralumin à la

corrosion et sa présence sous forme de particules dispersées de la phase T ($Al_{12}Mn_2Cu$), augmente la température de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques.

Le Duralumin contient aussi comme inclusions le fer et le silicium, le fer diminue la résistance et la plasticité du Duralumin. En se liant au cuivre, le fer affaiblit au vieillissement, l'effet durcissant, c'est pourquoi la teneur en fer ne doit pas dépasser 0,5 à 0,7 %. Le silicium contribue à la dégradation de la résistance, mais participe au durcissement avec une faible proportion.

L'alliage possède, à l'état initial, une résistance de 16 à 22 kp/mm^2, une dureté de 40 à 60 kp/mm^2, un allongement de 15 à 25 %. Si on fait le recuit de cet alliage à T = 500°C pour une durée de maintient de 15 min, suivie d'un refroidissement brusque (à l'eau), on obtient ne amélioration des propriétés mécaniques tels que l'augmentation de la résistance à 32 kp/mm^2, de la dureté à 78 kp/mm^2 et l'allongement reste prés de 25 %.

Sur la figure 68, on peut constater l'élévation des propriétés mécaniques (résistance et dureté) en fonction du temps de maintient. On remarque que l'allongement reste presque invariable.



Courbe A : Résistance et dureté

Courbe B : Allongement

fig. 68

La résistance (ténacité) de cet alliage peut encore augmenter en faisant subir à l'alliage une déformation à froid, on obtient un alliage avec des propriétés équivalentes à celles d'un acier de construction à résistance moyenne, c'est à dire on atteint une résistance à la rupture équivalente à 55 kp/mm², un allongement d'environ 10 % et un bon rapport de la limite élastique. Ce type de traitement thermique est utilisé pour certains alliages métalliques dans le système Al-Cu, (fig.69).

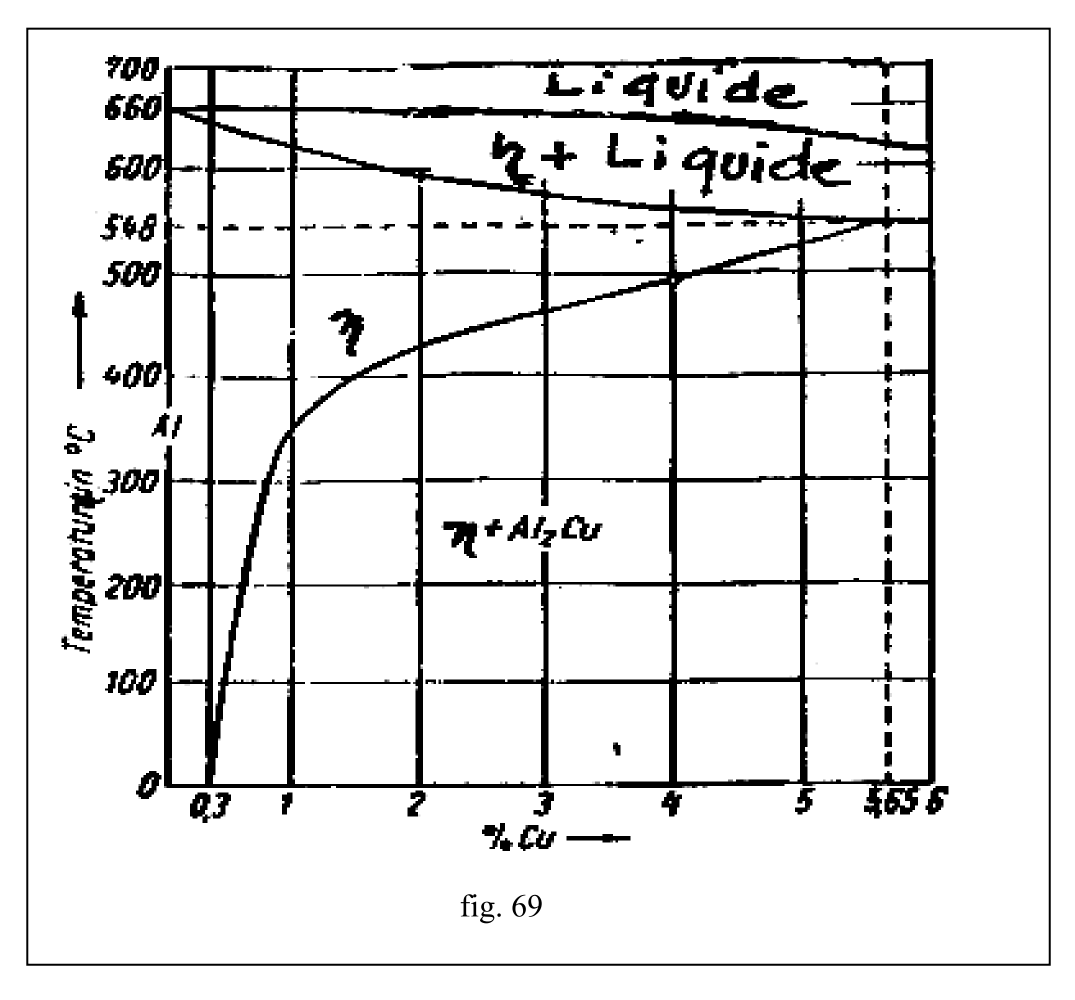


fig. 69

On reconnaît que l'aluminium possède une certaine solubilité pour le cuivre, c'est à dire dans le cristal d'aluminium, les atomes d'aluminium peuvent être remplacés par des atomes de cuivre. La solubilité est maximale à 5,65 % de Cu et à T = 548°C.

A température ambiante, un alliage avec 4°/o de Cu se compose de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur inférieure à 0,5 % de Cu et d'une liaison intermétallique Al_2Cu. Un tel alliage, s'il est

porté à la température de 550°C, les cristaux mixtes Al-Cu sont en situation d'absorber une grande partie du cuivre, ensuite la liaison Al_2Cu sera dissoute et on aura uniquement le présence de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur de 4 %.

Cette dépendance entre la température et la solubilité est une condition pur le vieillissement. Maintenant si on refroidit lentement l'alliage homogène à partir de T = 550°C on a une précipitation de nouveau Al_2Cu correspondant à une solubilité qui baisse, mais on refroidit brusquement à l'eau. L'alliage homogène, dans ce cas, le cuivre reste dans les cristaux: mixtes, c'est à dire on obtient une solution sursaturée. Cet état est instable et les atomes de cuivre cherchent à se diffuser des cristaux mixtes.L'augmentation de la dureté et de la résistance ont pour cause le phénomène de l'état instable. Donc on peut retenir que :

- Dans l'état stable on a la formation d'une phase de cristaux mixtes avec solubilité décroissante pour des températures décroissantes.
- Lors du chauffage dans le domaine de solubilité élevée avec ensuite le refroidissement induit la formation de cristaux mixtes sursaturés par surfusion.

Dans le tableau ci-dessous, on peut constater que les propriétés mécaniques de l'alliage diminuent avec l'augmentation de la section (S) des barres ou l'épaisseur (E) des tôles.

Alliage	**Produit**	**$\sigma_{0,2}$ (kp/mm²)**	**σ_{ZB} (kp/mm²)**	**δ (%)**	**HB (kp/mm²)**
AlCuMg1	**Barre**				
	S ≤ 2000 mm²	**26**	**38**	**12**	**100**
	S = 2000 à 8000 mm²	**27**	**40**	**10**	**100**
	S ≥ 8000 mm²	**22**	**36**	**8**	**90**
	Tôle				
	E = 1 à 10 mm	**27**	**40**	**15**	**100**
	E = 10 à 20 mm	**24**	**38**	**14**	**90**
AlCuMg2	**Barre**				
	S = 500 à 2000 mm²	**31**	**45**	**9**	**115**
	S = 2000 à 8000 mm²	**34**	**48**	**8**	**125**
	S ≥ 8000 mm²	**25**	**40**	**6**	**105**
	Tôle				

	E = 1 à 6 mm	**29**	**44**	**14**	**110**
	E = 6 à 10 mm	**28**	**43**	**12**	**110**
	E = 10 à 20 mm	**26**	**41**	**10**	**110**

Cela est expliqué par l'influence de la vitesse de refroidissement exigée pour la surfusion des cristaux mixtes homogènes à haute température lors du refroidissement.

Avec l'augmentation de la section de la surface du matériau, la chaleur à évacuer es très importante et le refroidissement à l'intérieur du matériau (cœur) se ralentit, ce qui provoque lors du refroidissement une décomposition d'une partie des cristaux mixtes et lors du processus de durcissement, on n'a pas la présence de la totalité de la concentration de l'alliage et on ne peut pas atteindre une augmentation de la résistance, donc on a la présence d'un alliage avec une faible concentration en éléments durcissants. Donc il est très important de surveiller (utiliser) un refroidissement brusque surtout pour les alliages Al-Cu-Mg.

Le Duralumin livré en tôles, est protégé contre la corrosion par plaquage, c'est à dire par l'apport d'une couche fine d'aluminium très pur. L'épaisseur d'une telle couche doit être au moins de 4 % de l'épaisseur de la tôle. Le plaquage diminue sensiblement la résistance et la charge de rupture des tôles.

b. Alliage Al-Si-Mg (alliage Avial)

Ces alliages ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants à la corrosion. Leur durcissement est du à la précipitation de la phase durcissante Mg_2Si. Ce groupe d'alliage comprend les alliages avec 0,4 à 1,4 % Mg, 0,3 à 1,6 % Si et de 0 à 1 % Mn.

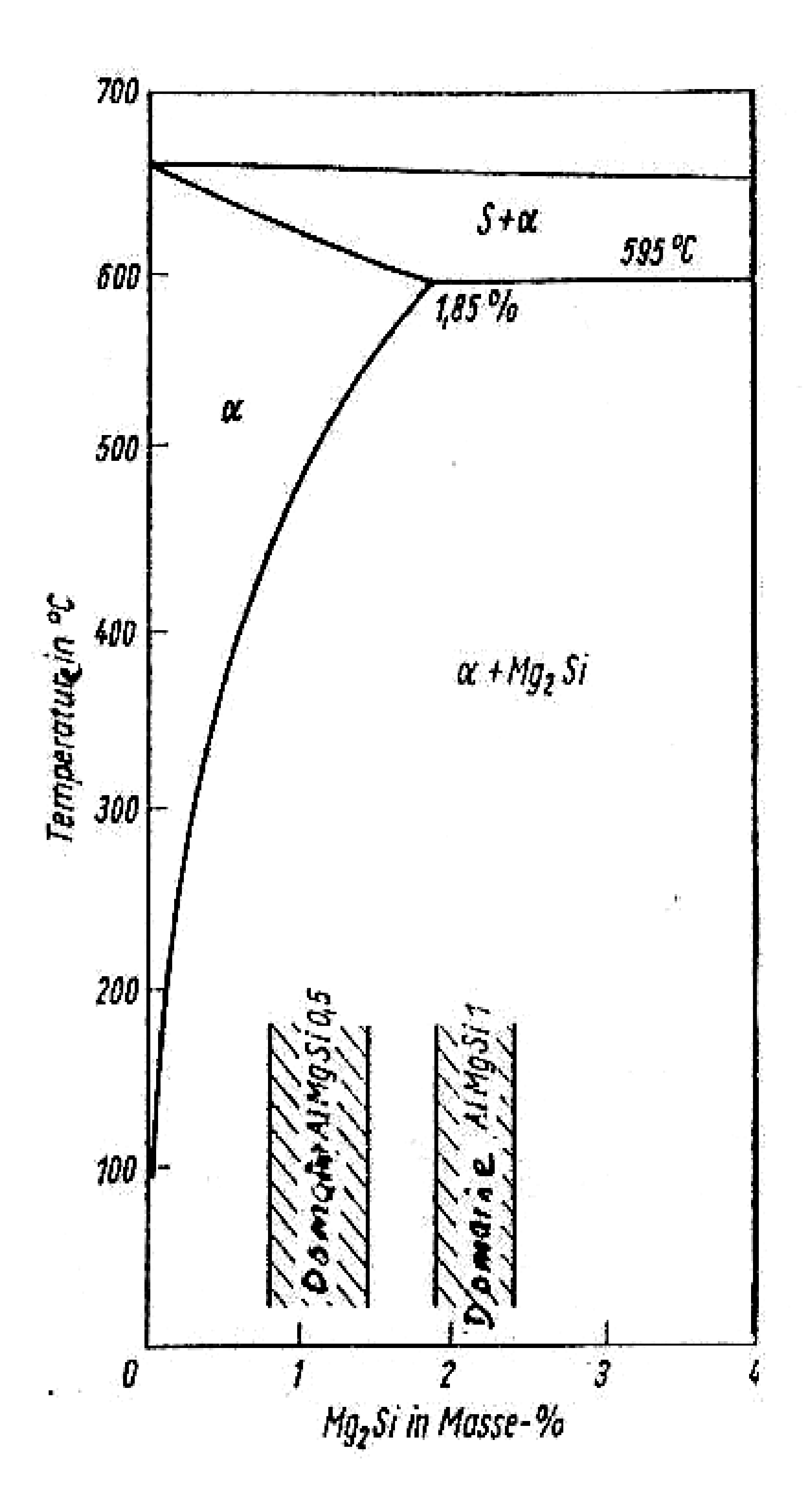


fig. 70

De bonnes propriétés peuvent être atteintes lorsque la composition du Mg_2Si correspond au rapport de Mg/Si = 1,7. Un surplus de silicium peut améliorer la résistance mais diminuer la tenue à la corrosion et la ténacité. Leur diagramme d'équilibre est donné par la figure 70.

Les alliages Al-Si-Mg sont moins résistants que le Duralumin mais ils ont une meilleur plasticité à froid et à chaud, ils se soudent bien et leur limite de fatigue est élevée.

Le recuit de dissolution s'effectue à une température de 500 à 540°C suivi d'un refroidissement brusque. Le durcissement à chaud s'effectue à une température de 140 à 160°C.

Les alliages avec des concentrations 0,5 % Si, 0,7 % Mg sont utilisée pur des buts décoratifs, fils et câbles électriques, tandis que les alliages avec 1,1 % Si et 1,0 % Mg sont utilisés en construction navale, aviation, mécanique de précision, électrotechnique et les pièces qui imposent une plasticité élevée à chaud et à froid.

c. Alliage Al-Zn-Mg

Les alliages appartenant à ce groupe ont la composition chimique suivante :

- Zn : 4 à 5 %
- Mg : 0,5 à 3,5 %
- Mn : 0 à 1 %
- Cr : 0 à 0,3 %

L'alliage avec 4 à 5 % Zn , 0,5 à 1,5 % Mg, 0 à 1 % Mn et 0 à 0,3% Cr se durcit automatiquement selon le recuit de dissolution à la température de 350 à 500°C, une trempe à l'eau n'est pas exigée.

La dureté maximale est atteinte après un séjour de 30 jours. Un durcissement à chaud à des températures de 120 à 140°C peut donner des valeurs de résistance élevées.

Après chauffage, par exemple lors du soudage, il y a renouvellement de l'effet de durcissement. L'alliage possède de bonnes propriétés de déformation et oxydable anodiquement à cause de sa structure homogène.

Une couche supplémentaire de protection conte les actions de corrosion est nécessaire.

Les phases durcissantes de cet alliage sont $MgZn_2$ et $Al_2Mg_3Zn_3$. Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que la plasticité et la tenue à la corrosion diminuent. La tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques peuvent être améliorés par l'addition de faibles quantités de manganèse, de chrome et de vanadium ou par un refroidissement lent jusqu'à moyen.

d. Alliage Al-Zn-Mg-Cu

Ce type d'alliage représente une suite développée des alliages AI-Zn-Mg, c'est un alliage à haute résistance. L'addition du cuivre et du manganèse augment la résistance mécanique, suivant la composition, on atteint des valeurs de 46 à 54 kp/mm².

La bonne tenue à la corrosion est obtenue aussi par l'addition de Mn, Cr, Va ou par le plaquage. Comme matériaux de plaquage, on utilise un alliage d'aluminium contenant du zinc (1 à 3) %.

Le recuit de dissolution s'effectue près de 450 à 470°C avec trempe à l'eau. La valeur de résistance maximale est atteinte par un durcissement à chaud de 120 à 140°C.

Les phases durcissantes de cet alliage sont : $MgZn_2$, la phase T ($Al_2Mg_3Zn_3$) et la phase S (AI_2CuMg). Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que leur plasticité et tenue à la corrosion diminuent. Ils ont une bonne plasticité à chaud et se prêtent relativement bien au corroyage à froid après recuit. L'alliage avec 3,8 à 5,2 % Zn, 2,4 à 3,8 % Mg, 0,4 à 1,0 % Cu, 0,1 à 0.4 % Mn et 0,1 à 0,3 % Cr à une résistance à la traction de 46 à 50 kp/mm^2 et est utilisé dans le domaine de construction à sollicitation élevée, aviation, machines, exploitation minière. Un alliage avec 5,1 à 6,1 % Zn, 2,1 à 2,9 % Mg, 1,2 à 2 % Cu, 0 à 0,3 % Mn, 0,18 à 0,4 % Cr à une résistance à la traction de 50 à 54 kp/mm^2 est utilisé dans le domaine de l'aviation, le matériel roulant et les machines complexes. La composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales de l'alliage Al-Zn-Mg-Cu sont données dans le tableau ci-dessous.

Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	$R_{0,002}$ (Kp/mm^2)	R (Kp/mm^2)	A (%)
1,4 à 2,8	0,4 à 1,0	0,4 à 1,0	0,7 à 1,2	5 à 8,6	0,1 à 0,25	53 à 63	56 à 57	7 à 8

3.5. Alliages d'aluminium de fonderie (moulage)

Une grande partie des besoins en aluminium est utilisée comme pièce de fonderie. La matière première utilisée pour l'obtention des alliages d'aluminium de fonderie est, le plus souvent, la matière secondaire tels que déchets, rebuts d'aluminium, etc. Dans certains pays, elle est basée sur 70 % de la production.

Avant, on utilisait comme alliages d'aluminium de fonderie, les alliages d'aluminium avec des teneurs élevées en Cu ou Zn, alors qu'aujourd'hui, l'alliage le plus utilisé, est l'alliage d'Al-Si avec des additions en magnésium et cuivre.

Les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques avec une résistance élevée à la corrosion.

Les principaux alliages de fonderie avec leurs compositions chimiques sont indiqués sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'autres éléments					
	Mg	**Si**	**Mn**	**Cu**	**Ti**	**Fe**	**Zn**	**Ni**	**Cu**	**Pb+Sn**
G-Al Mg3	**2,0 à 4,0**	**0,5 à 1,3**	**0,05 à 0,5**			**0,5**	**0,10**		**0,05**	
G-Al Mg3dek	**2,0 à 4,0**	**≤ 0,5**	**0,05 à 0,5**			**0,5**	**0,10**		**0,05**	
G-Al Mg5	**3,5 à 5,5**	**0,5 à 1,3**	**0,05 à 0,5**			**0,5**	**0,10**		**0,05**	
G-Al Si 5 Mg	**1,35 à 0,6**	**4,5 à 6,0**	**0,15 à 0,5**		**0,15**	**0,5**	**0,10**		**0,05**	
G-Al Si 7 Mg	**0,25 à 0,5**	**6,5 à 8,0**	**0,15 à 0,5**		**0,15**	**0,5**	**0,10**		**0,05**	
G-Al Si 10 Mg	**0,2 à 0,4**	**8,5 à 10,5**	**0,15 à 0,5**		**0,15**	**0,6**	**0,10**		**0,05**	
G-AlSi10Mg(Cu)	**0,2 à 0,4**	**8,5 à 11,5**	**0,2 à 0,5**		**0,15**	**0,6**	**0,5**	**0,3**	**0,5**	**0,2**
G-Al Si 6 Cu	**0,25 à 0,55**	**5,5 à 7,0**	**0,2 à 0,5**	**1,0 à 2,0**	**0,15**	**0,6**	**0,5**	**0,2**		**0,1**
G-Al Si 7 Cu1	**0,25 à 0,6**	**6,5 à 8,0**	**0,2 à 0,5**	**1,0 à 2,0**	**0,15**	**0,8**	**1,0**	**0,3**		**0,3**
G-Al Si 7 Cu2	**0,2 à 0,7**	**6,5 à 8,0**	**0,2 à 0,5**	**1,0 à 2,0**	**0,15**	**0,9**	**1,2**	**0,3**		**0,3**

Les propriétés mécaniques, ainsi que le type de moulage pour lequel elles sont destinées, sont représentées dans le tableau suivant.

Désignation	Type de moulage	Etat	σ 0,2	σ ZB	δ	HB	σ bW	σ 0,2 300 h 200°C
			(Kp/mm²)		(%)	(Kp/mm²)		
G-Al Mg3	Sable	S.T.	8 (7)	14 (13)	3 (3)	50 (50)	6	9
	Sable	T.C.	13 (12)	21 (16)	2 (2)	72 (65)	8	
	Coquille	S.T.	9 (7)	15 (14)	3 (3)	50 (50)	7	
	Coquille	T.C.	15 (12)	22 (18)	4 (2)	70 (65)	8,5	
G-Al Mg5	Sable	S.T.	8,5 (8)	15 (13)	2 (1)	55 (55)	6	8
	Coquille	S.T.	9 (8)	17 (14)	3 (1)	60 (55)	7,5	
G-AlSi5Mg	Sable	S.T.	10 (9)	14 (13)	1 (0,5)	55 (55)	6	
	Sable	T.A.	14 (12)	18 (14)	2 (1)	70 (70)	7,5	
	Sable	T.C.	20 (16)	22 (17)	1 (0,5)	80 à 110	7,5	
	Coquille	S.T.	12 (10)	16 (14)	1,5 (1)	60 (60)	7	
	Coquille	T.A.	16 (13)	20 (17)	2 (1)	70 (70)	8,5	
	Coquille	T.C.	22 (18)	24 (19)	1 (0,5)	90 à 115	8,5	
G-AlSi6Cu	Sable	S.T.	11 (9)	16 (15)	1 (1)	70 (65)	6,5	8,5
	Sable	T.A.	15 (15)	21 (18)	1,5 (1)	80 (75)	8	7
	Sable	T.C.	18 (16)	22 (19)	0,6 (,05)	90 à 115	8,5	6,5
	Coquille	S.T.	12 (11)	19 (17)	2 (1)	75(70)	8,5	5,5
	Coquille	T.A.	16 (16)	23 (20)	2 (1)	90 (80)	9,5	
	Coquille	T.C.	20 (18)	24 (22)	0,8 (0,6)	95 à 120	9,5	

G-AlSi7Cu2	**Sable**	**S.T.**	**12 (11)**	**17 (14)**	**0,6 (0,4)**	**75 (70)**		
	Sable	**T.A.**	**17 (13)**	**19 (15)**	**0,3**	**85 (80)**		
	Coquille	**S.T.**	**14 (12)**	**19 (15)**	**0,8 (0,4)**	**80 (75)**		
	Coquille	**T.A.**	**18 (14)**	**20 (15)**	**0,4**	**85 (80)**		
	Pression	**S.T.**	**14**	**20**	**1**	**80**		
G-AlSi10Mg	**Sable**	**T.A.**	**18 (17)**	**20 (20)**	**1,2 (1)**	**80 :110**	**10**	
	Coquille	**S.T.**	**11 (10)**	**20 (18)**	**2 (1)**	**65 (60)**	**9**	
	Coquille	**T.A.**	**20 (18)**	**24 (22)**	**1,2 (1)**	**85 à 115**	**11**	**5,5**
	Pression	**S.T.**	**12**	**21**	**1,5**	**70**	**7,5**	
S.T. : Sans Traitement **T.C. : Traitement à Chaud** **T.A. : Traitement A Froid**								

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevés lorsque sa structure comporte un eutectique. Un eutectique se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limite dans l'aluminium. C'est ce qui détermine la teneur en éléments plus élevés dans les alliages de fonderie que dans les alliages corroyables.

Le plus souvent, on emploie les alliages AlSi, AlCu, AlMg additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (AlSi), de silicium (AlMg), de manganèse, nickel et chrome (AlCu).

Pour affiner les grains, et par suite, améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculants (Ti, Zr, B, Cl, V, etc.).

De nombreuses pièces coulées soumises au traitement thermique. suivant le caractère de la pièce et les conditions de son service, on a recourt à l'une des modalités de traitements thermiques suivantes :

a. Vieillissement par revenu (T1) : (notation conventionnelle T1) T = 170 à 180°C pendant un séjour de 5 à 20 h et sans trempe préalable, destiné au renforcement de la résistance et amélioration de l'usinage.

b. Recuit (T2) : T ≈ 300°C, séjour de 5 à 10 h, refroidissement à l'air, destiné à supprimer les contraintes produites par la coulée. ainsi que les contraintes résiduelles dues à l'usinage, il augmente légèrement la plasticité.

c. Trempe et maturation (T3, T4) : T = 510 à 545°C, trempe à l'eau chaude (40 à 100°C). Après la trempe, les pièces coulées sont maintenues un temps assez long à l'ambiante. Le régime T_1 correspond à la trempe et maturation.

d. Trempe et vieillissement par revenu de courte durée (T5) : (2 à 3) h, à 175°C. Ces températures et durées font que le vieillissement n'est pas complet. Destinés à l'augmentation de la résistance tout en gardant la plasticité élevée.

e. Trempe et vieillissement par revenu complet (T6) : T = 200°C, séjour de 3 à 5h, assurent une résistance maximale mais diminue la plasticité.

f. Trempe et revenu de stabilisation (T7) : T = 230 à 250°C pendant 3 à 10 h, appliqués pour stabiliser la structure et les changements volumiques de la pièce coulée tout en conservant une résistance suffisante.

g. Trempe et revenu d'adoucissement (T8) : T = 240 à 260°C durant 3 à 5h, la température élevée du revenu diminue sensiblement la résistance mais augmente la plasticité et la stabilité des dimensions.

3.5.1. Alliages Al-Si

Ces alliages portent le nom de ''silumines'', lesquels s'apparentent quand à leur composition à un alliage eutectique, leur coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses. Ils sont destinés à la coulée sous pression.

Sur le diagramme d'équilibre AI-Si (fig.71), on peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux mixtes riches en aluminium α et se termine par la cristallisation de l'eutectique α + β (Si) et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments.

La phase (Si) est présente en se déposant d'abord sous forme de gros. cristaux aciculaires (en forme d'aiguilles), qui jouent le rôle d'entailles internes dans la solution solide α plastique, les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles.

Plus près de l'alliage eutectique, se trouvent le plus souvent les cristaux primaires de silicium, c'est à dire, il y a accumulation (excès) de cristaux de silicium, qui ne sont pas fondus et lors de la recristallisation, ils agissent comme germes cristallins pour la cristallisation du silicium.
Donc avec l'augmentation du chauffage du bain métallique ainsi que l'augmentation de la vitesse de refroidissement, on obtient une solidification normale de l'eutectique, c'est à dire une cristallisation couplé α + (Si) est atteinte. Une telle cristallisation est obtenue aussi par le traitement du bain métallique en ajoutant des inoculants tels que le sodium.

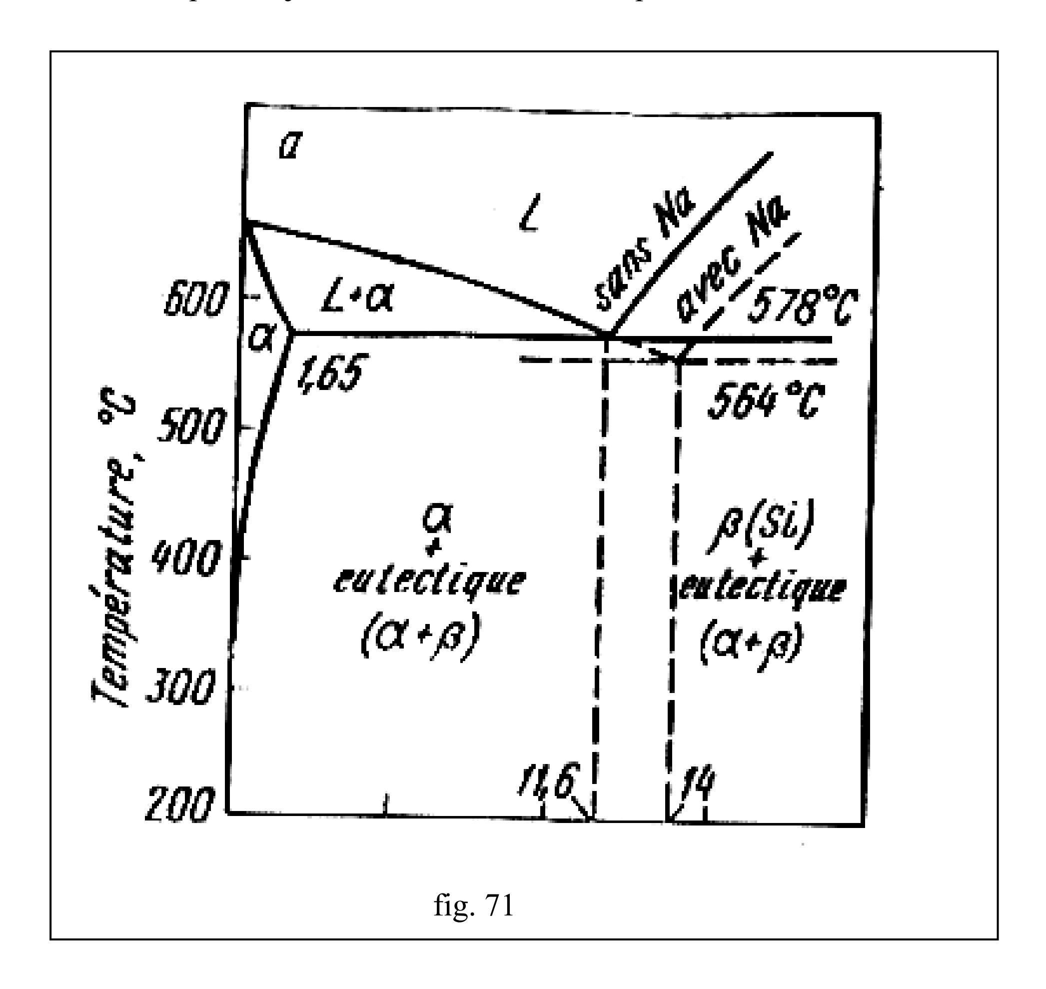


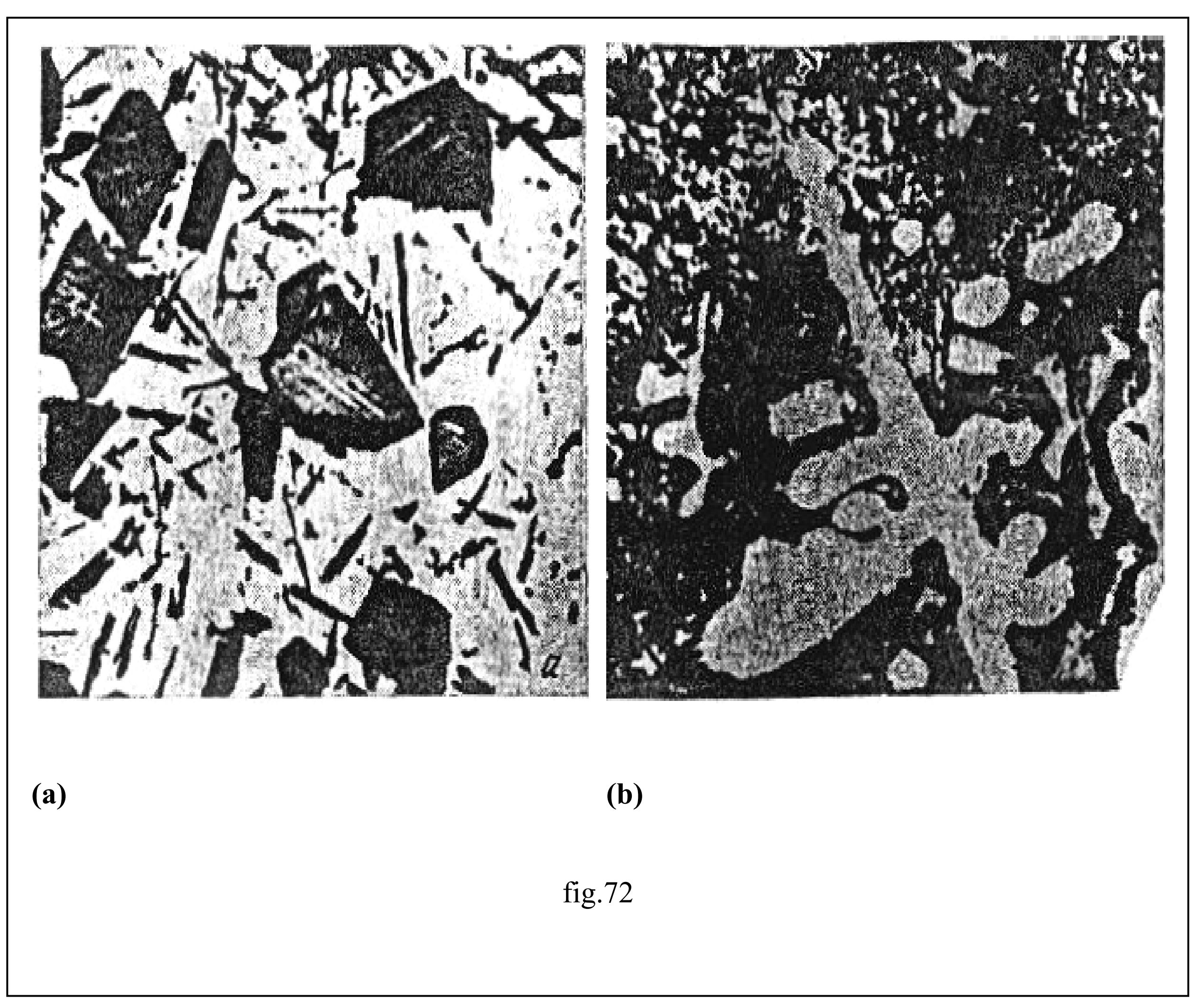
fig. 71

Cette observation est faite en premier par A. Pacz en 1921 sur un alliage eutectique AI-Si (silumin) et elle est connue sous le nom de «effet silumin». Il s'agit de l'affinage de la structure et l'élimination des cristaux de silicium en excès. Les silumines sont inoculés au sodium (0,05 à 0.08) %, par addition au bain de sels de 67 % NaF et 33 % NaCl. Le traitement d'affinage du bain métallique, proprement, dit s'effectue de la manière suivante.
De 730 à 750°C, on plonge une quantité (0,25 % du bain métallique) et le sel d'affinage dans le bain métallique, après sa fusion, on mélange et après dépôt du sel, on l'extrait du bain, ensuite à

l'aide d'une cloche de plongée, on ajoute du sodium propre (0,03 à 0,06) %. Ce dernier s'évapore en agissant sur le bain métallique et à la fin, on refait le traitement du bain une dernière fois avec une quantité (0,75%) et après un temps très court, c'est à dire juste après son introduction, on procède à la coulée du métal. Ce traitement doit être effectué directement avant la coulée du métal car le sodium, peut brûler en quittant le bain et son effet sera diminué.

La quantité de sodium exigée pour la coulée en sable est importante par rapport celle exigée dans la coulée en coquille, car la solidification rapide dans la coquille donne une cristallisation eutectique. En présence du sodium, les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent et l'alliage hypereutectique devient hypoeutectique.

Dans ce cas au lieu du silicium excédentaire, on observe dans la structure de l'alliage, l'apparition de cristaux de la solution α comme le montre les figures : 72 a (avant modification) et 72 b (après modification).



(a) **(b)**

fig.72

Dans ces conditions l'eutectique acquiert une structure plus fine et se compose de petits cristaux des solutions β(SI) et α.
Pendant la solidification, les cristaux de silicium se couvrent d'une pellicule de siliciure de sodium (Na_2Si) qui rend difficile leur croissance. Cette structure inoculée améliore les propriétés mécaniques de l'alliage (fig. 73) dont la courbe 1 est modifiée et la courbe 2 non modifiée.

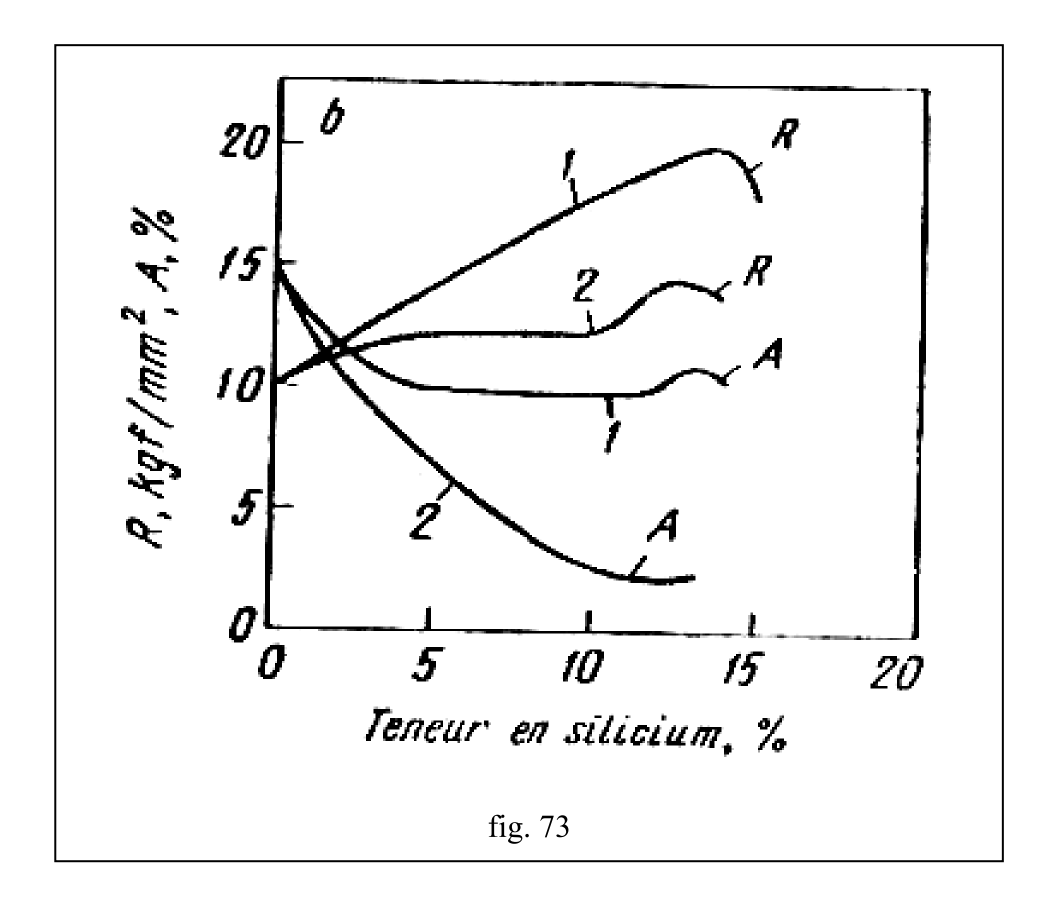


fig. 73

L'alliage Al-Si ne contenant pas de Mg, Mn. ne subit pas le traitement thermique de durcissement. Les alliages hypoeutectiques additionnés de manganèse en plus de l'inoculation, peuvent être durcis par un traitement thermique. La phase durcissante est Mg_2Si. L'introduction simultanée de magnésium et de cuivre peut donner lieu à la formation des phases $CuAl_2$ et $W(Al_XMg_5Cu_4Si_4)$.
Les pièces en alliage contenant du Mg et Mn, sollicitées par des charges moyennes, subissent seulement le vieillissement par revenu (T1), alors que les grosses pièces très changées, (carters des compresseurs, carters et bloc cylindres des moteurs), la trempe et le vieillissement par revenu (T6). Les pièces coulées en alliages contenant du Mg. imposant une plasticité accrue, sont

soumises à la trempe (T4) et pour augmenter leur résistance, à la trempe et au vieillissement (T6). Lorsqu'il importe d'obtenir une plasticité élevée et une stabilité des dimensions, la trempe est suivie de revenu à 250°C pendant 3 à 5 h.

Les principaux types d'alliages AI-Si figurent sur le tableau ci-dessous, selon TGL.

Désignation	**Composition (%)**	**Addition (%)**	**Limite 0,2 (Kp/mm²)**	**Résistance Traction R (Kp/mm²)**	**Allonge-ment rupture (%)**	**HB (Kp/mm²)**	**Résist. flexion alternée Kp/mm²**
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm^3							
G-AlSi12	**Si:11,0 à 13,5 Mn : 0 à 0,5 Al : reste SiFe > 0,4 → Mn > 0,25**	**Fe : 0,6 Ti : 0,15 Zn : 0,10 Cu : 0,05 Mg :0, 05**	**8 à 9 (7)**	**17 à 22 (16)**	**8 à 4 (2)**	**50 à 60 (45)**	**5,5 à 6,5**
G-AlSi12g			**9 à 10 (8)**	**18 à 22 (16)**	**10 à 6 (5)**	**50 à 60 (50)**	**8,5 à 10**
GK-AlSi12			**9 à 11 (9)**	**20 à 26 (16)**	**7 à 3 (2)**	**55 à 70 (50)**	**7 à 8**
GK-AlSi12g			**9 à 11 (9)**	**20 à 26 (16)**	**10 à 6 (4)**	**50 à 60 (50)**	**9 à 10**
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm^3							
G-AlSi10Mg	**Si: 9,0 à 11,0 Mg : 0,2 à 0,4 Mn : 0 à 0,5 Al : reste SiFe > 0,4 → Mn >**	**Fe : 0,6 Ti : 0,15 Zn : 0,10 Cu : 0,05**	**9 à 11 (8)**	**18 à 24 (17)**	**5 à 2 (2)**	**55 à 65 (55)**	**6,5 à 7,5**
G-AlSi10Mga			**17 à 26 (17)**	**22 à 20 (20)**	**4 à 1 (1)**	**80 à 110 (75)**	**9 à 11**
GK-AlSi10Mg			**11 à 15 (10)**	**20 à 26 (18)**	**4 à 1 (1)**	**65 à 85 (60)**	**8 à 10**
GK-AlSi10Mga			**20 à 28 (18)**	**24 à 32 (22)**	**4 à 1 (1)**	**85 à 115(80)**	**10 à 11**

	0,25						
Poids spécifique : 2,70 Kg/dm^3							
G-AlSi15Mg	**Si: 4,5 à 6,0**	**Fe : 0,5**	**10 à 13 (9)**	**14 à 18 (13)**	**3 à 1 (0,5)**	**55 à 70 (55)**	**6 à 6,5**
G-AlSi15Mgka	**Mg : 0,5 à 0,8**	**Zn : 0,10**	**15 à 18 (12)**	**18 à 25 (14)**	**5 à 2 (1)**	**70 à 85 (70)**	**7 à 7,5**
G-AlSi15Mga	**Mn : 0 à 0,5**	**Cu : 0,05**	**22 à 29 (16)**	**24 à 30 (17)**	**2 à 0,5(0,5)**	**80 à 110 (80)**	**7 à 7,5**
GK-AlSi15Mg	**Ti : 0 à 0,20**		**12 à 16 (10)**	**16 à 20 (14)**	**4 à 1,5 (1)**	**90 à 75 (60)**	**7 à 7,5**
GK.AlSi15Mgka	**Al : reste SiFe > 0,4**		**16 à 19 (13)**	**21 à 27 (17)**	**6 à 2 (1)**	**70 à 90 (70)**	**8 à 8,5**
GK-AlSi15Mga	**→ Mn > 0,25**		**24 à 29 (18)**	**26 à 30 (19)**	**3 à 1 (0,5)**	**90 à 110 (90)**	**8 à 8,5**

3.5.2. Alliages Al-Mg

Les alliages Al-Mg possèdent de faibles propriétés de fonderie du fait qu'ils ne contiennent pas d'eutectique. Leur propriété caractéristique est la bonne tenue à la corrosion et leurs propriétés mécaniques sont accrues avec une usinabilité élevée. L'addition à l'alliage AI-Mg (9,5 à 11,5) % Mg et d'inoculants (Ti, Zr), améliorent les propriétés mécaniques, alors que le béryllium diminue l'oxydabilité de la fusion, ce qui permet de la conduire sans flux de protection. Le magnésium accroît fortement la résistance des alliages (fig.74) jusqu'à 12 ou 14 %, avec le Mg, la plasticité change peu mais ensuite elle se dégrade brusquement.

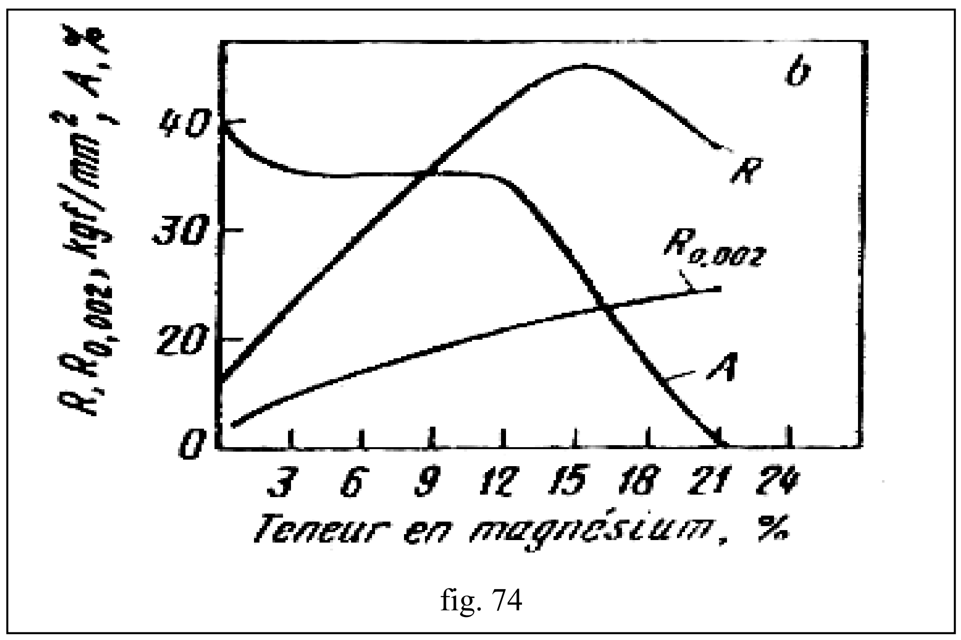


fig. 74

Les alliages Al-Mg sont en plus additionnés de manganèse qui forme des particules dispersées Al_6Mn, durcit l'alliage et affine le grain. Ces types d'alliages sont prévus pour les pièces travaillant dans une atmosphère humide, par exemple dans la construction navale et aéronautique. La structure de ces alliages, se compose de solution solide α et d'inclusions grossières de particules Al_3Mg_2 qui se déposent aux joints de grains en fragilisant l'alliage, (fig. 75).

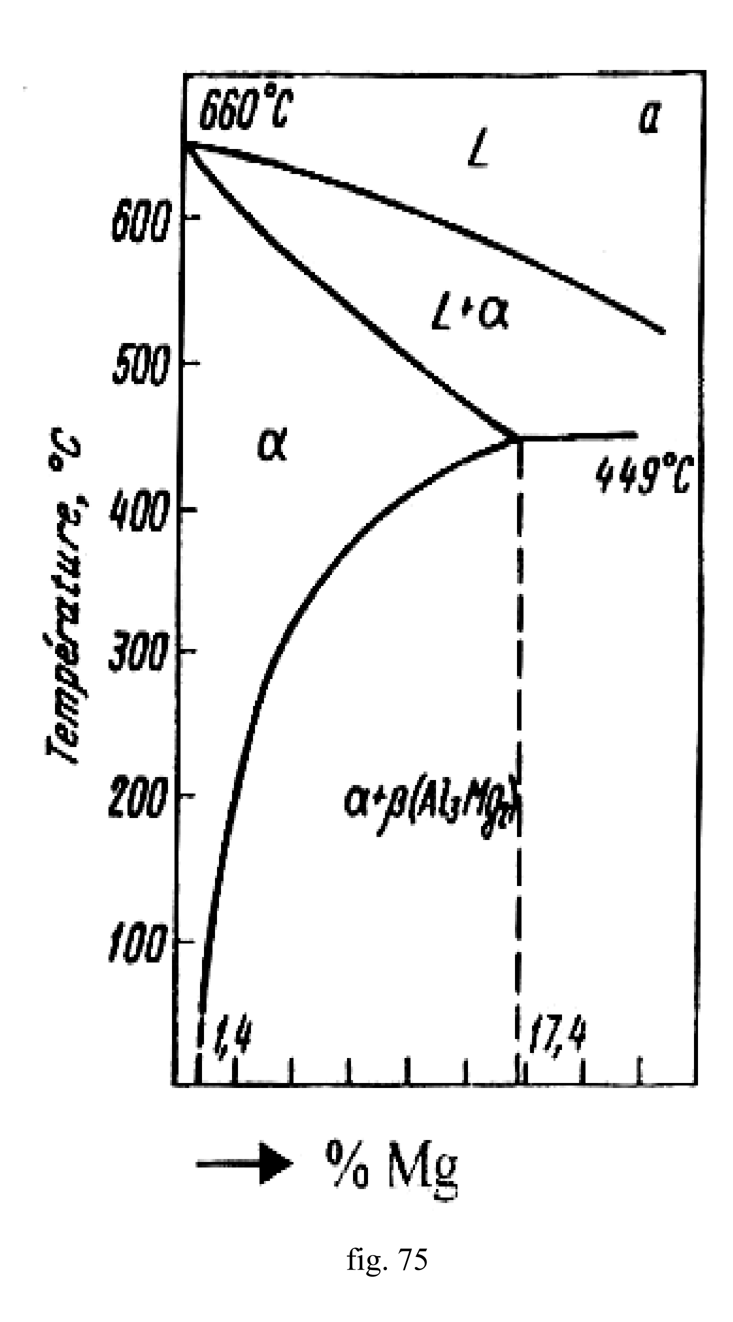


fig. 75

C'est pourquoi, ces alliages s'emploient après trempe à 430°C avec refroidissement à l'huile (40 à 50)°C et un séjour à la température de trempe pendant 12 à 20 h, ce qui assure la dissolution des particules Al_3Mg_2 dans la solution solide α et l'obtention après trempe, d'une solution solide homogène. L'addition aux alliages Al-Mg jusqu'à 1,5 % Si, améliore les propriétés de fonderie par suite la formation d'un eutectique triple. Ces alliages s'emploient dans la construction navale et aéronautique.

Les principaux types d'alliages AI-Mg sont donnés sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0,2 (Kp/mm²)	Résistance Traction R (Kp/mm²)	Allonge-ment rupture (%)	HB (Kp/mm²)	Résist. flexion alternée Kp/mm²
Poids spécifique : 2,7 Kg/dm³							
G-Al Mg3	Mg : 2,0 à 4,0 Si : 0 à 1,3 Mn : 0 à 0,5 Ti : 0 à 0,20 Al : reste	Fe : 0,5 Zn : 0,10 Cu : 0,05	8 à 10 (7)	14 à 19 (13)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	6 à 6,5
G-Al Mg3a			13 à 16 (12)	21 à 28 (16)	8 à 2 (2)	70 à 90 (65)	7,5 à 8
GK-Al Mg			9 à 12 (7)	15 à 20 (14)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	7 à 7,5
GK-Al Mg3a			15 à 18 (12)	22 à 33 (18)	15 à 4 (2)	65 à 90 (65)	8 à 9
Poids spécifique : 2,6 Kg/dm³							
G-Al Mg5	Mg : 4,0 à 5,5 Si : 0,5 à 1,5 Mn : 0 à 0,5 Ti : 0 à 0,20 Al : reste	Fe : 0,5 Zn : 0,10 Cu : 0,05	9 à 10 (9)	16 à 9 (13)	5 à 2 (1)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
GK-Al Mg5			9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 3 (1)	60 à 80 (55)	7 à 7,5
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm³							
G-Al Mg5 Cu	Mg : 4,0 à 5,5 Si : 0,5 à 1,5	Fe : 0,5 Zn : 0,10	9 à 10	16 à 19 (9)	5 à 3 (1)	55 à 70 (55)	
			9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 2 (2)	60 à 80 (55)	

	Cu : 0,4 à 0,6 Mn : 0 à 0,5 Ti : 0 à 0,20 Al : reste						

3.5.3. Alliages Al-Cu

Leur composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales sont données dans le tableau suivant.

Mn (%)	Cu (%)	Autres et Ti (%)	R (Kp/mm²)	$R_{0,002}$ (Kp/mm²)	A (%)
0,6 à 1	4,5 à 5,3	0,25 à 0,45	24	16	7

Ces alliages possèdent, après traitement thermique, de hantes propriétés mécaniques à l'ambiante et aux températures élevées et se prêtent bien a l'usinage. Leurs propriétés de fonderie sont basses (grand retrait, aptitude à la fissuration à chaud). L'alliage s'emploie pour la fabrication des moulages de petites pièces de fermes simples (armatures, supports).

Pour obtenir une résistance accrue après la trempe, les moulages sont soumis au revenu à 150°C pendant 2 à 4 heures. La présence dans la solution solide du manganèse et la formation dans le volume du grain des phases intermétalliques, augmentent la résistance à chaud. L'addition du titane affine le grain.

Le durcissement de l'alliage s'obtient par trempe et vieillissement à 175°C pendant 3 à 5 h. Les alliages Al-Cu sont peu stables à la corrosion et pour parer à cet inconvénient, les pièces coulées subissent ordinairement l'anodisation.

3.5.4. Alliages Al-Si-Cu

Ce groupe d'alliages comprend les alliages avec une bonne coulabilité et de bonnes propriétés de résistance. La tenue à la corrosion est faible, cela est du à la présence du cuivre. Les alliages avec 6 % Si, ≈ 3 % Cu, sont utilisés dans tous les domaines de construction des machines et des moteurs où ils existent uniquement des sollicitations moyennes. Les alliages avec une teneur de 12 % Si ne durcissent pas eux mêmes et ils sont utilisés pour les pièces compliquées.

3.6. Le cuivre et ses alliages

Le mot cuivre est dérivé du mot « cuprum » qui signifie métal de l'île de Chypre, où il fut découvert à l'état natif pendant l'antiquité. Son numéro atomique dans la classification de Mandéléev est 29, sa masse atomique 63.54. Le cuivre est un métal rouge à cassure rose.

La teneur totale de l'écorce terrestre en cuivre, est relativement faible (0,01 % en masse). Dans la nature on le trouve à l'état natif plus souvent que les autres métaux. Les blocs de métal natif atteignent parfois des dimensions importantes. A cause de son existence à l'état natif et de la facilité de son usinage, il fut utilisé par l'homme avant tout autre métal.

3.6.1. Procédés d'élaboration et d'affinage du cuivre

La plus grande partie du cuivre est obtenue à partir des minerais de cuivre qui sont formés de sulfures et d'oxydes. mais généralement 80 % du cuivre est obtenu à partir des sulfures tels que :

- Chalcopyrite : Cu_2S,F_2S_3, qui est le répandu, il est d'une couleur jaune d'or.
- Chalcosine Cu_2S de couleur noire.
- Les oxydes :
    - Cuprite : Cu_2O.
    - Malchite : $CuCO_3$, $Cu(OH)_2$.
    - Azurite : $CuCO_3$, $Cu(OH)_2$.

Les minerais de cuivre contiennent toujours du fer en grande quantité sous forme de FeS_2, et contiennent d'autres éléments tels que Sb, As, Pb, Bi, Au, Ag, Ni. Ce qui rend la teneur du cuivre très faible dans les minerais.

Les procédés métallurgiques d'élaboration du cuivre se différencient selon la composition chimique du minerai de cuivre. Il existe deux types de procédés :

- Procédé par voie sèche.
- Procédé par voie humide.

Dans cette partie on abordera que le premier procédé.

Procédé par voie sèche :

Ce procédé est le plus important et opère sur des minerais dont la teneur minimale en métal après concentration avoisine 15 %. Plusieurs phases peuvent être distinguées dans ce procédé.

a. Concentration du minerai :

Les minerais de cuivre sont très pauvres en cuivre (1 à 4) % et il est nécessaire de leur faire subir un traitement d'enrichissement. Le minerai est concentré ou enrichi par flottation afin d'éliminer une partie de la frange et d'amener la teneur en cuivre jusqu'à 25 %.

b. Elimination partielle du fer :

Le concentré du minerai, les additions et le coke sont enfoncées dans un four à cuve où ils sont fondus dans sa partie inférieure où une partie du fer est éliminée et passe dans la scorie et le soufre subit un grillage partiel. Après cette fusion, on obtient la charge fusionnée appelée matte, laquelle est rassemblée dans un avant-creuset ou elle est encore séparée de la scorie.

La matte contient entre 20 à 50 % de cuivre, 20 à 30 % de soufre et de 30 % de fer. Dans la scorie se trouvent de 0,2 à 0,4 % de cuivre. La grande quantité de fer et de soufre se trouvant dans la matte est éliminée par oxydation lors de son enfournement dans le convertisseur à tambour.

c. Oxydation de la matte :

L'oxydation de la matte appelée aussi convertissage, du nom de l'appareil utilisé, se fait en deux phases dans le même appareil. Durant la première phase s'effectue l'oxydation du sulfure de fer (élimination du fer) par soufflage d'air avec addition de SiO_2. L'oxyde de fer forme s'unit à la silice et est ainsi éliminée à l'état de scorie qui est par la suite évacuée.

$$2FeS + 3O_2 + SiO_2 \rightarrow 2FeO.SiO_2 + 2SiO_2$$

Durant la deuxième phase, il reste uniquement Cu_2S (matte blanche) et l'oxydation continue par soufflage d'air afin de transformer le Cu_2S en cuivre brut.

$$Cu_2S + O_2 \rightarrow 2Cu + SO_2$$

Dans le convertisseur, on a besoin d'ajouter du combustible car la combustion du soufre fournit la chaleur nécessaire pour la fusion de la charge. Le cuivre brut obtenu contient 97 à 99 % de cuivre et une série d'éléments secondaires tels que : Fe, As, Pb, Ni, Ag, Au. Le cuivre brut est ensuite affiné dans un four.

d. Affinage du cuivre brut :

L'affinage du cuivre comporte généralement deux phases successives : l'affinage par voie sèche au celui électrolytique.

- Affinage par voie sèche au four :

Le cuivre brut est affiné dans un four à flamme après fusion, on a de l'air pour abaisser la teneur en Pb, Fe et le reste du soufre. L'antimoine et l'arsenic sont aussi partiellement oxydés. Durant cette opération, une grande quantité du cuivre est oxydée, ce qui donne du Cu_2O, lequel est réduit à la fin de l'opération d'oxydation par addition du bois humide, ce qui provoque une formation de la vapeur d'eau et d'hydrogène carburé. Ce processus est appelé brossage.

Le cuivre obtenu après cette opération contient de 99 à 99,6 % de cuivre, une partie est coulée en blocs et en brames et porte le nom de cuivre affiné. L'autre partie est destinée à subir l'électrolyse et porte le nom de cuivre anodique.

- Affinage électrolytique :

L'affinage électrolytique du cuivre a deux buts essentiels :

- Obtenir du cuivre pur, ce qui conduit à l'augmentation de la conductibilité électrique et la capacité de déformation.
- **L'extraction des métaux purs (Au, Ag).**

L'électrolyse du cuivre s'effectue dans une solution d'acide sulfurique de 40 à 60°C avec une densité de 200A/m^2 (0,2 à 0,3) V. Le cuivre destiné à l'électrolyse est préparé sous forme de panneaux plats qui jouent le rôle d'anodes.

Le cuivre et les éléments qui l'accompagnent tels que Ni, Ph, Zn etc. sont dissous de l'anode dans l'électrolyte mais ne l'accompagnent pas dans la cathode à cause de leur potentiel de séparation (précipitation). Les autres éléments tels que Au, Ag, As et antimoine coulent lentement à partir de l'anode en formant une boue anodique, cette dernière est traitée pour en extraire l'argent et l'or. Un bon cuivre électrolytique, renferme jusqu'à 99,98 % Cu.

3.6.2. Cuivre pur (non allié)

C'est un métal rouge, plus ou moins foncé, présentant une cassure rose. L'application technique du cuivre, dans les différents domaines, est liée aux propriétés technologiques que présente ce métal tels que :

- Conductibilité thermique et électrique élevée.
- Bonnes propriétés de résistance.
- Bonne capacité de déformation.
- Bonne tenue à la corrosion.
- Bonne soudabilité.

Une amélioration des propriétés technologiques, mécaniques et de la tenue à la corrosion est obtenue par l’addition des éléments d’alliages tels que l’étain, le zinc, l’aluminium, le nickel, et d’autres éléments importants.

Une grande partie de la production de ce métal est utilisée à l'état pur et une faible partie comme alliage de cuivre. Grâce à son excellente conductibilité électrique et thermique, il est très utilisé surtout dans le domaine de l’électrotechnique. Le cuivre ne pourra jamais être remplacé par l’aluminium à cause de ses bonnes propriétés de soudage et sa bonne flexibilité et sa grande conductibilité.

Le tableau, ci-dessous, montre les différents types de cuivre pur avec les pourcentages d’inclusions (éléments secondaires).

Désignation	Inclusions en %											
	O2	Bi	Sb	As	Sn	Ni	Fe	Pb	Zn	S	Ag	P
Cuivre électrique libre d’oxygène												
Se-Cu 99,97	0,0003	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,003	0,002	0,005		0,002
Se-Cu 99,95	0,0008	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,003		0,005	
Cuivre raffiné et désoxydé												
Dr-Cu 99,99	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,04	
Dr-Cu 99,97	0,002	0,005	0,01		0,2		0,01	-		-	0,04	
Dr-Cu 99,95	0,003	0,05	0,05	0,005	0,4	0,05	0,03	-	0,01	-	-	
Cuivre avec oxygène												
E-Cu 99,9	0,04	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003	-
R-Cu 99,7	0,08	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,05	0,01	-	0,01	-	-
R-Cu 99,5	0,10	0,003	0,05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,05	-	0,01	-	-
R-Cu 99,25	0,06	0,02	0,05		-		-	0,1	-	0,02	-	-

Les élément secondaires dissous dans le cuivre, augmentent principalement la résistance spécifique électrique R = 1/ρ.

La figure 76 représente l'influence de certains éléments, comme impuretés ou éléments d'alliage, sur la conductibilité spécifique électrique.

La conductibilité électrique la plus élevée du cuivre, mesurée à la température de 20°C, est de 60,1 m/Ωmm².

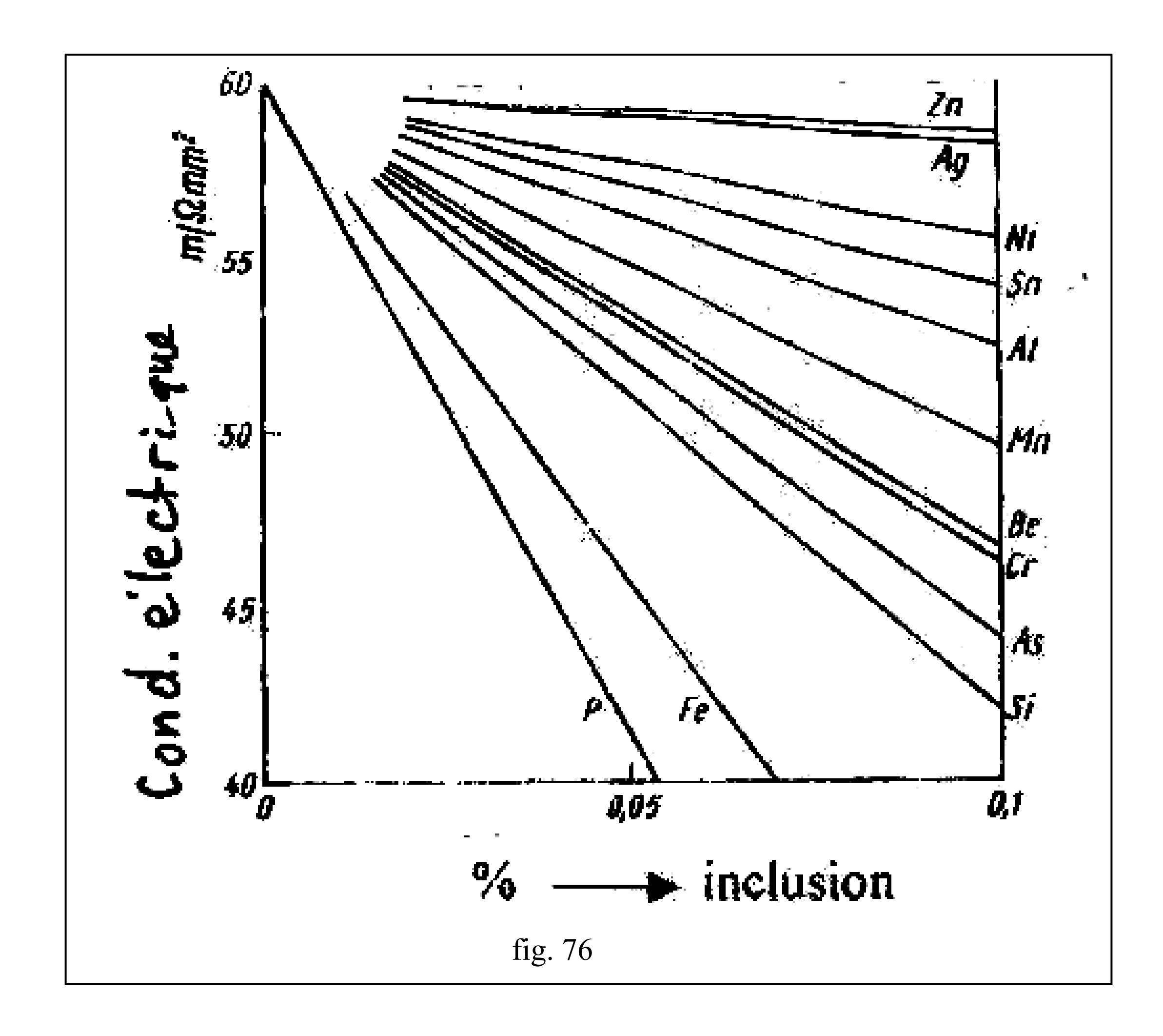


fig. 76

Les inclusions présentent dans le cuivre exercent une forte influence sur ses propriétés, selon leur action, elles peuvent être rangées dans l'ordre suivant :

a. Celles qui forment des solutions solides, Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P, etc. :

Ces inclusions améliorent la résistance mais altèrent brusquement les conductibilités électriques et thermiques (surtout Sb et AS). C'est pourquoi, les conducteurs de courant se font en cuivre contenant ≤ 0,002 % Sb et ≤ 0,002 % As. De plus l'antimoine rend difficile la déformation à chaud.

b. Les inclusions de plomb, bismuth, etc. :

Elles sont pratiquement insolubles dans le cuivre et forment avec lui des eutectiques, facilement fusibles, qui, précipités aux joints de grains, rendent plus difficile le corroyage. La figure 77 représente la microstructure du cuivre (a : avec addition de 0,2 % Bi et b : avec addition de 0,3 % Pb).

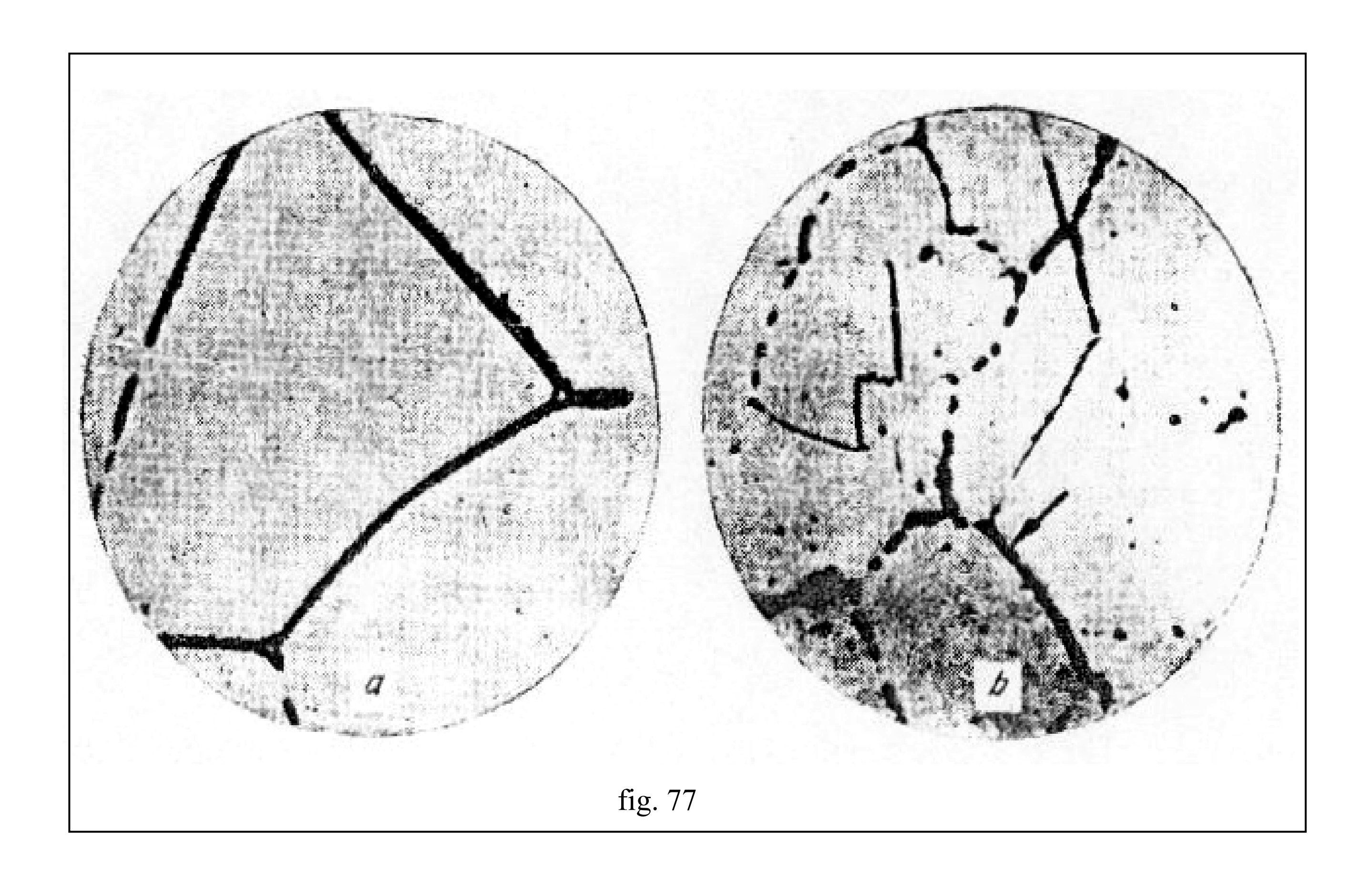


fig. 77

Lorsque la teneur en bismuth atteint 0,005 %, le corroyage à chaud désagrège le cuivre. Avec

une teneur en bismuth encore plus élevée, le cuivre devient fragile à froid. Ces inclusions influent peu sur la coulabilité électrique.

c. Les inclusions d'oxygène et de soufre :

Elles forment avec le cuivre des combinaisons fragiles Cu_2O, Cu_2S, qui entrent dans la composition de l'eutectique, (fig.78).

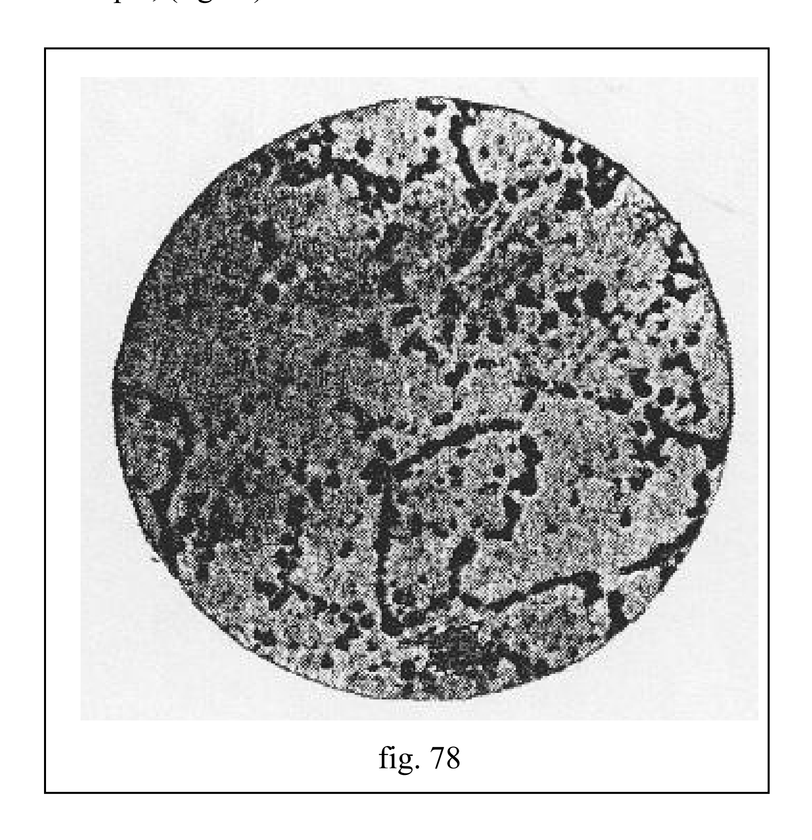


fig. 78

L'influence de ces inclusions sur la conductibilité électrique est faible. Le soufre améliore l'usinabilité. L'oxygène forme avec le cuivre un protoxyde et provoque la fragilisation par hydrogène.

Lorsque le cuivre est chauffé (recuit), dans une atmosphère contenant l'hydrogène ou d'autres gaz, ces derniers diffusent en profondeur. Si le cuivre comporte des inclusions Cu_2O, elles réagissent avec H_2, en formant des vapeurs d'eau suivant la réaction :

$Cu_2O + 2H \rightarrow 2Cu + H_2O$ vapeur d'eau

Cette réaction s'accompagne d'augmentation de volume car les molécules H_2O (vapeur d'eau) ne peuvent pas se diffuser dans le réseau cristallin du cuivre, elles se rassemblent dans de petits espaces produisant ainsi une pression élevée et donne lieu à la formation de microfissures qui

peuvent entraîner la rupture du métal, donc le métal devient fragile et une éventuelle déformation conduit à l'interruption des limites de grains (joints de grains).

Ce phénomène est connu sous la maladie d'H_2 et ne se manifeste pas lorsque le cuivre ne contient pas de Cu_2O où la totalité de l'O_2 est liée avec d'autres éléments. dont leurs oxydes sont réduits par H_2 comme par exemple le phosphore et le lithium. Donc il est recommandé d'effectuer le recuit du cuivre contenant du Cu2O dans une atmosphère non réductrice.
Le soudage résiste bien à la corrosion dans les conditions atmosphériques ordinaires, dans l'eau douce, l'eau de mer et dans d'autres milieux agressifs. Mais sa tenue est mauvaise dans les gaz sulfureux et l'ammoniac.

Caractéristiques physiques du cuivre :

- Température de fusion : 1083°C.
- Réseau cristallin CFC (a = 3,607Å)= $3{,}6.10^{-8}$ cm.
- Point d'ébullition : 2350°C.
- Chaleur de fusion : 49,9 cal/g.
- Chaleur spécifique : $Cp_{20°C}$ = 0,092 cal/g.yrd.
- Massé volumique à 20°C : 8,94 g/cm^3.
- Conductibilité thermique (20°C) : 0,941 cal/cm.S.grd = 385 W/µk.
- Coefficient de dilatation linéaire (0 à 1083)°C = 2,25 %.
- Résistivité électrique (20°C) : ρ = 1,724 µΩcm ≈ 0,0175 $\Omega mm^2.m^{-1}$.

Le cuivre est le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité après l'argent (6 %), d'où son usage comme chaudière à évaporer, serpentin, cuves, fils et câbles pour transport d'énergie électrique, enroulements de dynamos, etc. La conductibilité, du cuivre est influencée par la température, les traitements mécaniques et les inclusions Pour le cuivre pur, elle peut diminuer pour des températures de 100°C jusqu'à 78 % de sa valeur à 20°C, de même que la déformation à froid provoque des distorsions de réseau, ce qui diminue la conductibilité. Les distorsions peuvent être égalisées par un traitement thermique à 450°C de même que les inclusions agissent aussi dans le même sens.

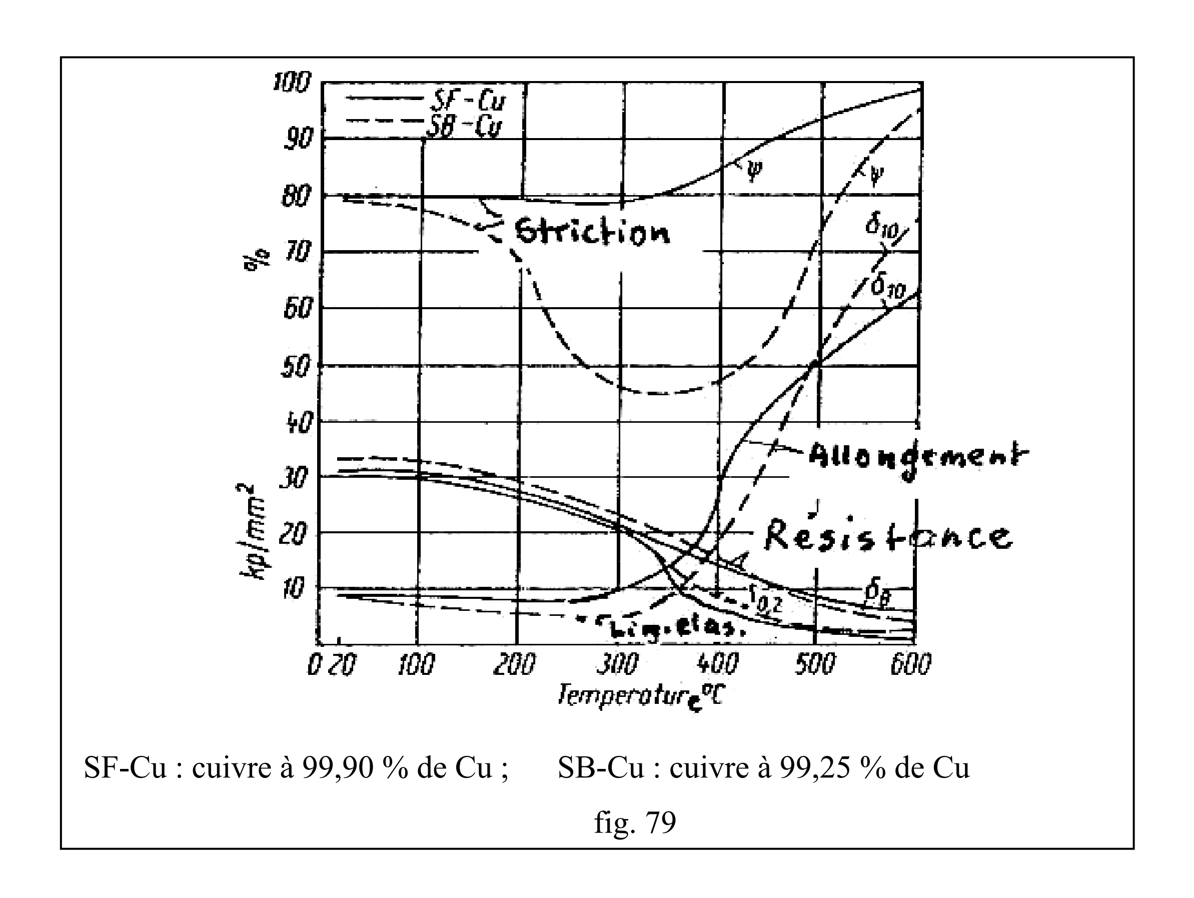
Caractéristiques mécaniques du cuivre :

Le cuivre est un matériau assez ductile et tenace, mais il est mou et de plus, il présente une faible limite élastique. C'est pour cette raison que dans beaucoup de cas, on l'utilise sous

forme d'alliages. Le cuivre est malléable à froid et s'écrouit facilement. Il se prête aisément au corroyage, mais son usinage est mauvais. A cause de sa grande ténacité, au cours du travail a froid, on doit procéder à un recuit pour faire cesser l'écrouissage, mais on peut également effectuer le travail à chaud de manière que le recuit compense l'écrouissage. Un fort retrait rend mauvaises, ses propriétés de fonderie. Le cuivre se prête bien au brasage et fondage à l'étain. Le cuivre à faible teneur en oxygène est plus élastique, il est le matériau principal de la fabrication des conducteurs de courant. La fluidité du cuivre fondu lui permettrait d'être facilement coulé, mais les soufflures (gaz dissous SO_2, CO_2, …) inévitables, rendent l'opération difficile. Le cuivre peut être forgé et laminé vers 600°C, mais nécessite des recuits au rouge sombre avec un refroidissement à l'eau.

Caractéristiques	Etat recuit	Etat écroui
Rm (traction) en N/mm²	210	400
Re en N/mm²	40	-
Module élasticité : E en N/mm²	12 500	12 500
Allongement A en %	40	5
Dureté HB	45 à 60	90 à 110

Les propriétés mécaniques du cuivre (résistance), dépendent principalement du degré de déformation et de la température. Sur la figure 79, sont représentées les propriétés de résistance du cuivre libre d'oxygène à 99,25 et à 99,90 % Cu en fonction de la température.



SF-Cu : cuivre à 99,90 % de Cu ; SB-Cu : cuivre à 99,25 % de Cu

fig. 79

3.6.3. Alliages de cuivre

Le cuivre pur n'est employé que pour ses propriétés de conductibilité électriques. Par contre, la présence d'inclusions même en très faibles proportions, change profondément ses propriétés. Parmi les inclusions, on peut citer brièvement :

- Celles qui forment des solutions solides : Ni, Zn, Sn, Al, ….
- Celles qui sont insolubles dans le cuivre : Pb, Bi.
- Celles qui forment avec le cuivre des combinaisons fragiles, (Cu_2O et Cu_2S) qui entrent dans la composition de l'eutectique.

Les alliages de cuivre possèdent de hautes propriétés mécaniques et technologiques et résistent bien à l'usure et à la corrosion.

Les alliages de cuivre sont classés en deux catégories :

- Cuivre faiblement allié.
- Cuivre fortement allié.

3.6.3.1. Cuivre faiblement allié

Ce sont les alliages de cuivre qui contiennent une teneur en éléments d'addition inférieure à 1 % (sauf celle du Béryllium qui peut atteindre 2 %). Ils restent en général bons conducteurs

électriques, assez résistants à la corrosion et acquièrent des propriétés mécaniques améliorées par écrouissage ou durcissement structural.

Parmi les alliages de cuivre faiblement alliés, on distingue :

a. Alliage Cu-Ag (0.08 % Ag) :

L'argent, comme élément d'addition, augmente la température de recristallisation et la résistance au fluage. Cet alliage conserve ses propriétés jusqu'à 200°C et convient pour le bobinage de machines électriques tournantes.

b. Alliage Cu-Cd (0,7 à 1 % Cd) :

A l'état écroui,. la résistance mécanique, la limite de fatigue et la limite de fluage sont très améliorées par rapport au cuivre pur. Il est utilisé pour des fils conducteurs, des électrodes de soudage et des ressorts conducteurs. Avec 1 % Cd et 0,15 % Sn, les propriétés mécaniques s'améliorent encore.

c. Alliage Cu-Te (0,3 à 0.9 % Te) :

L'addition de tellure, permet d'améliorer la résistance mécanique et l'usinabilité grâce aux tellures insolubles qui fragmentent les copeaux.

d. Alliage Cu-Cr (0,5 à 0,9 % Cr) :

Cet alliage est à durcissement structural (trempe à l'eau à 1000°C, revenu à 450°C). Ses propriétés se conservent jusqu'à 450°C. Sa résistance à la traction atteint 500 N/mm² et sa limite élastique 450 N/mm². Il est employé pour les électrodes de soudage par ponts, les contacteurs de puissance, etc.

e. Alliage Cu-Be (2 % Be) :

Alliage à durcissement structural (trempe à l'eau à 800°C, revenu à 320°C). Ses propriétés mécaniques sont très élevées et se conservent jusqu'à 300°C. Il est employé comme ressorts, rondelles, relais, membranes, etc.

f. Alliage Cu-As (0,5 % As) :

C'est un alliage très malléable à froid. Il est utilisé pour la fabrication des rouleaux d'imprimerie.

g. Alliage Cu-Ni-P (1 % Ni et 0,2 % P)

Utilisé après trempe à 93°C et revenu à 500°C, il possède une résistance à la traction de l'ordre de 700 N/mm².

3.6.3.2. Cuivre fortement allié

On distingue deux groupes essentiels d'alliages de cuivre fortement alliés :

a. Les laitons : composés de cuivre et de zinc (Cu-Zn).
b. Les bronzes : composés de cuivre et d'étain (Cu-Sn) et d'autres éléments parmi lesquels peut être le zinc mais combiné à d'autres éléments.

Les alliages de cuivre sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et technologiques et une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

3.6.3.3. Les laitons (Alliages Cu-Zn)

Le nom laiton est donné aux alliages doubles ou à composants multiples à base de cuivre dans lesquels, l'élément d'alliage principal est le zinc. Les laitons possèdent une couleur allant du rose au jaune suivant l'augmentation de la teneur en zinc.

L'augmentation de la teneur en zinc, fait disparaître la couleur rouge du cuivre en donnant la couleur jaune du laiton, cela est remarquable à partir environ de 15 % Zn. Le diagramme Cu-Zn est représenté sur la figure 80.

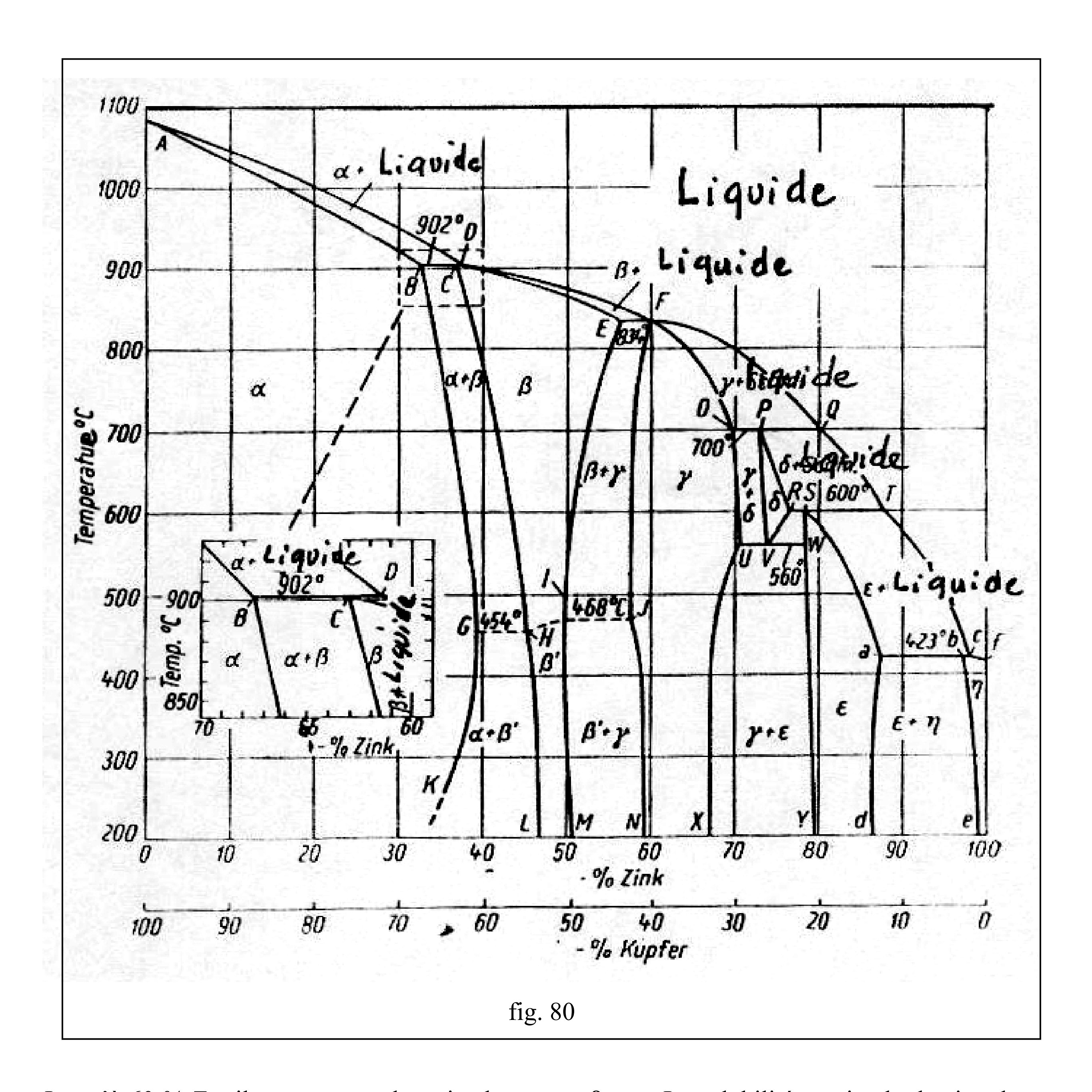


fig. 80

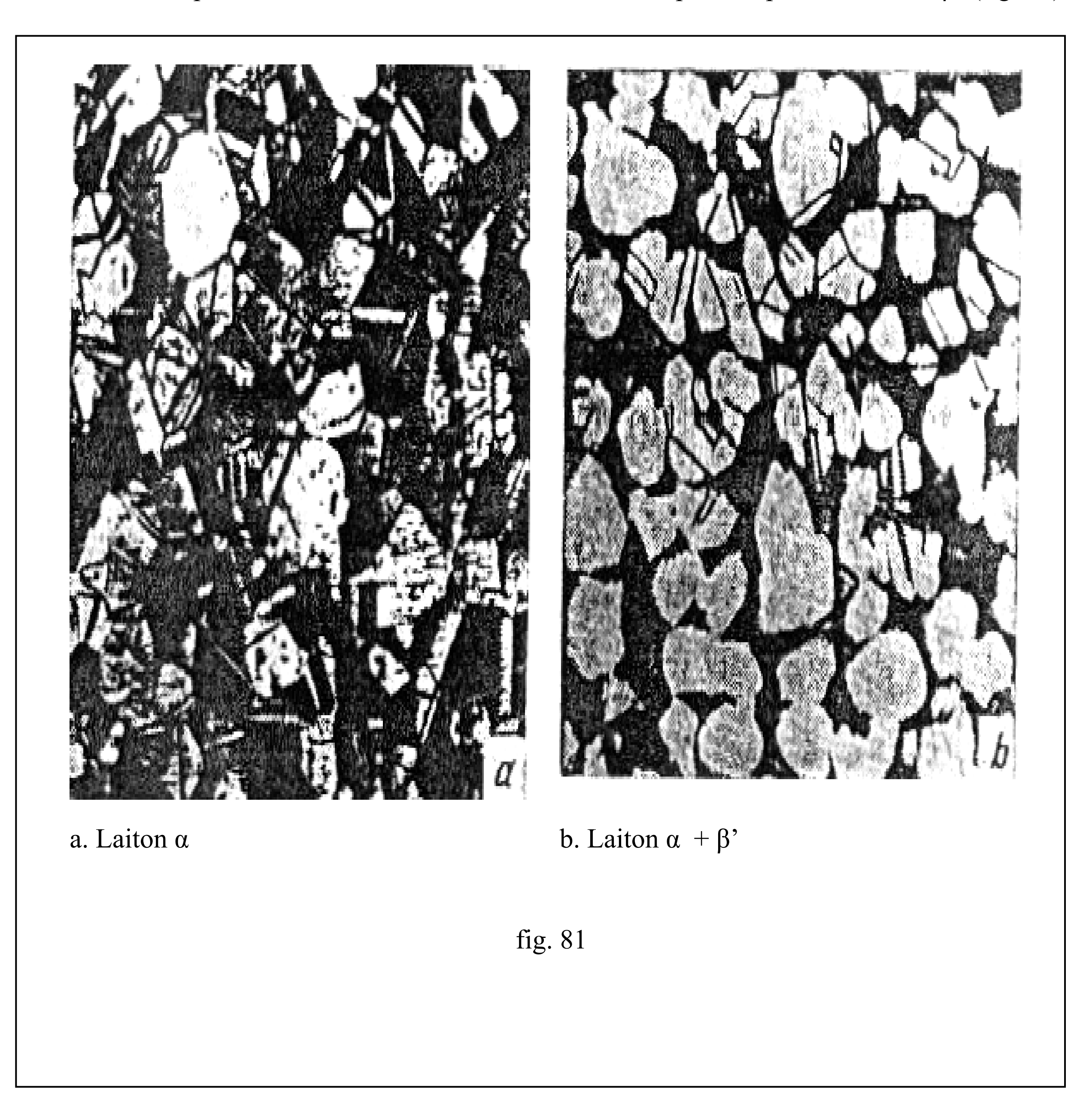
Jusqu'à 60 % Zn, il se compose de trois phases : α, β et γ. La solubilité maximale de zinc dans les cristaux mixtes α a pour valeur 39 %. La phase α est une solution de zinc dans le cuivre à réseau CFC de cuivre.

Pour des teneurs de zinc élevées, il y a formation de la phase β avec réseau CC et aux températures élevées, la distribution des atomes de la phase β est désordonnée, en cet état la phase β est plastique.

Aux températures inférieures à 454 ou 468°C, la disposition des atones de cuivre et de zinc dans cette phase devient ordonnée et la phase est alors notée β’. A la différence de la phase β la phase β’ est plus dure et plus fragile.

A partir de 50 % de zinc, il y a formation de la phase γ avec un réseau compliqué et une grande fragilité, ce qui rend la déformation très mauvaise.

En général, les alliages avec une teneur en zinc supérieure à 50 %, ne sont pas techniquement intéressants. Le plus souvent, la structure des laitons se compose de phase α ou α + β’ (fig. 81).



a. Laiton α

b. Laiton α + β’

fig. 81

Les différents types de laitons selon TGL, sont représentés sur le tableau ci-dessous.

Désignation		**Composition en %**								
Nouvelle	**Ancienne**	**Cu**	**Pb**	**Zn**	**Fe**	**Sn**	**Al**	**Mn**	**Pb**	**Tot**
CuZn40Pb2	**Ms58**	**56,0 à 60,0**	**1,0 à 3,5**	**Reste**	**0,5**	**0,3**	**0,1**	**0,2**	**-**	**1,2**
CuZn40	**Ms60**	**59,0 à 62,0**	**-**	**Reste**	**0,2**	**0,2**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**1,0**
CuZn39Pb	**Ms60Pb**	**59,0 à 62,0**	**0,5 à 2,5**	**Reste**	**0,3**	**0,2**	**0,1**	**0,2**	**-**	**0,5**
CuZn37	**Ms6j**	**62,0 à 65,0**	**-**	**Reste**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,5**
CuZn36Pb1	**Ms63Pb**	**62,0 à 65,0**	**0,2 à 3,0**	**Reste**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**-**	**0,4**
CuZn30	**Ms70**	**69,0 à 72,0**	**-**	**Reste**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,03**	**0,3**
CuZn20	**Ms80**	**78,0 à 81,0**	**-**	**Reste**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,03**	**0,3**
CuZn15	**Ms85**	**84,0 à 86,0**	**-**	**Reste**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,03**	**0,3**
CuZn10	**Ms90**	**89,0 à 91,0**	**-**	**Reste**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,03**	**0,2**
CuZn4	**-**	**95,0 à 97,0**	**-**	**Reste**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,03**	**0,2**

Sur le tableau ci-dessous sont données les valeurs des caractéristiques physiques principales des laitons en fonction du % Cu..

Cu	**P**	**Coefficient d'allongement 10^{-6}/ °C**		**Condition électrique**	**Condition de chaleur**		**Point de fusion**		**Point ébul. à 760 mm Hg**
%	**g/cm3**	**25 à 100°C**	**25 à 300°C**	**m/Ωmm²**	**Cal/cm**	**s.grd**	**°C**		
				20°C	**20°C**	**200°C**	**Sup.**	**Inf.**	**°C**
90	**8,80**	**17,4**	**18,3**	**25,5**	**0,42**	**0,51**	**1030**	**1045**	**1500**
85	**8,73**	**17,7**	**18,7**	**21,5**	**0,37**	**0,45**	**1005**	**1025**	**1300**
80	**8,67**	**18,0**	**19,1**	**19,0**	**0,34**	**0,41**	**980**	**1000**	**1240**
72	**8,56**	**18,5**	**19,8**	**16,5**	**0,30**	**0,37**	**980**	**960**	**1155**
67	**8,50**	**18,8**	**20,2**	**15**	**0,28**	**(0,35)**	**935**	**930**	**1130**
63	**8,47**	**19,0**	**20,6**	**15**	**0,27**	**(0,34)**	**902**	**910**	**1110**
60	**8,46**	**19,2**	**20,8**	**15**	**0,27**		**895**	**900**	**1100**

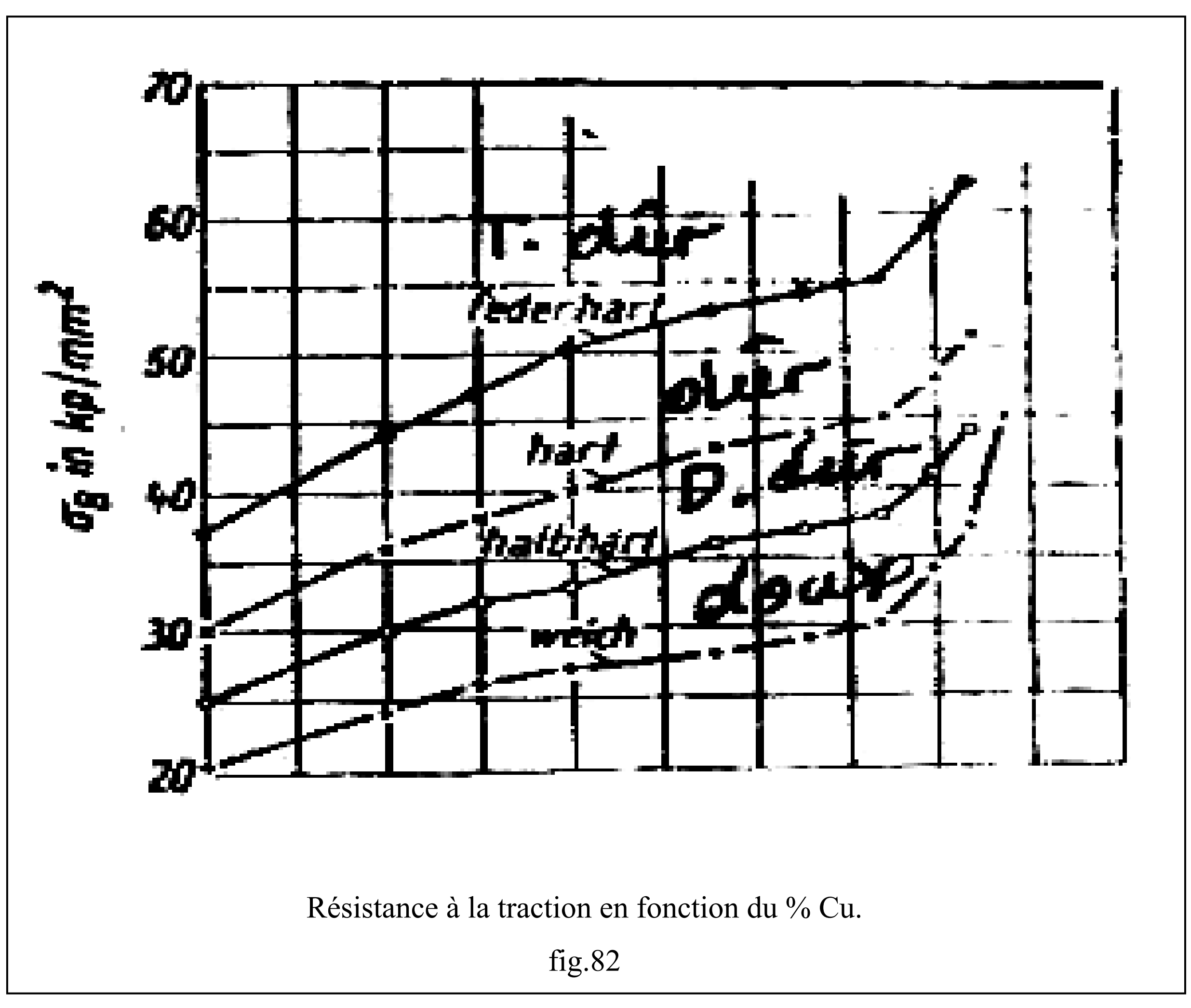
58	**8,44**	**19,3**	**20,9**	**15**	**0,27**		**890**	**895**	**1080**
56	**8,42**	**19,4**	**21,0**	**15**	**-**		**885**	**890**	**1070**

Les indications se rapportent à l'état doux du métal, la relation entre les valeurs de conductibilité électrique et conductibilité thermique est déterminée par la loi de Wiedmann Frauzshe. La conductibilité électrique est obtenue d'après la formule :

Conductibilité thermique = (0,04 à 0,016) x conductibilité électrique.

Les valeurs de la chaleur spécifique dans le domaine α, dépendant généralement de la teneur du cuivre. Ils augmentent avec l'augmentation de la teneur en zinc dans le domaine (α + β) et idem avec l'augmentation de la température.

Les figures 82, 83 et 84 représentent, respectivement, la dépendance entre la résistance de traction, l'allongement et la dureté HB des différents états de durcissement avec le % Cu.

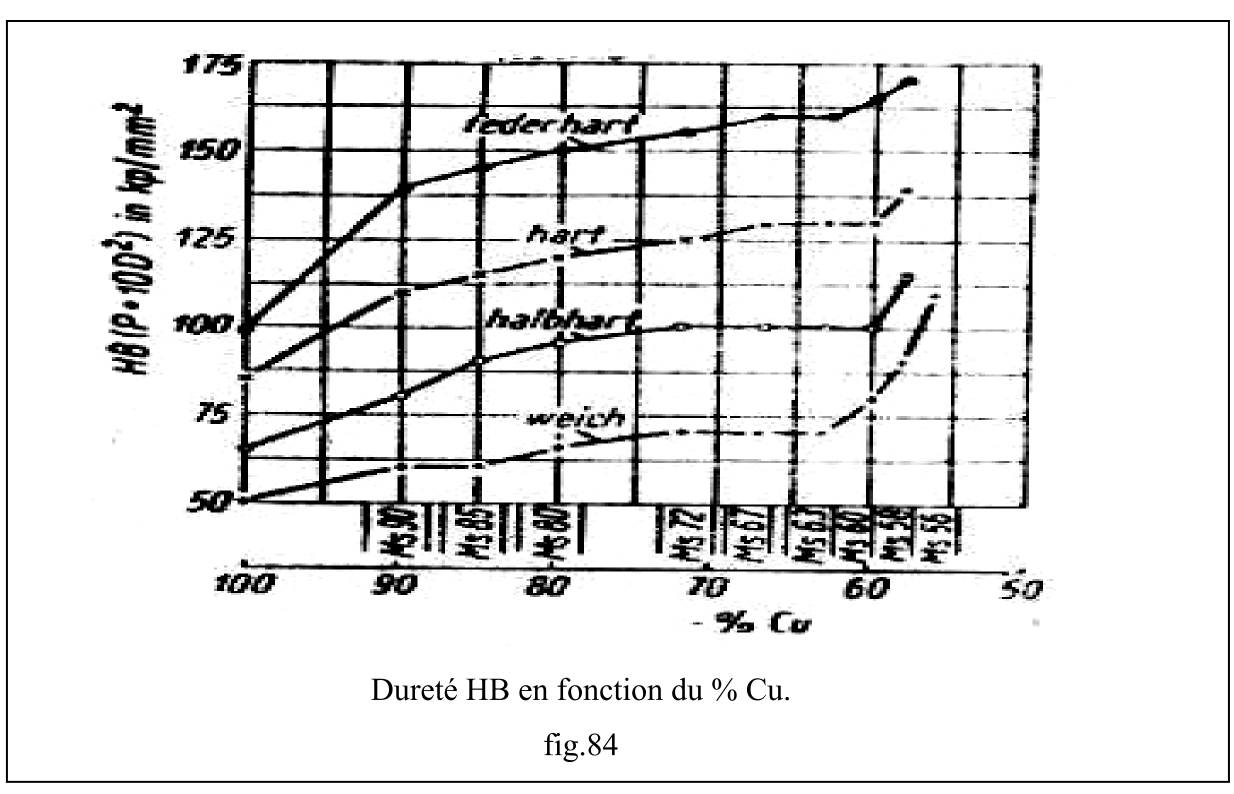


Résistance à la traction en fonction du % Cu.

fig.82

Allongement en fonction du % Cu.

fig.83



Dureté HB en fonction du % Cu.

fig.84

Les propriétés de résistance du laiton en fonction du % Zn sont représentées sur la figure 85.

Avec l'augmentation de la teneur en Zn dans les cristaux mixtes α, il y a augmentation de la résistance de traction et de l'allongement à la rupture.

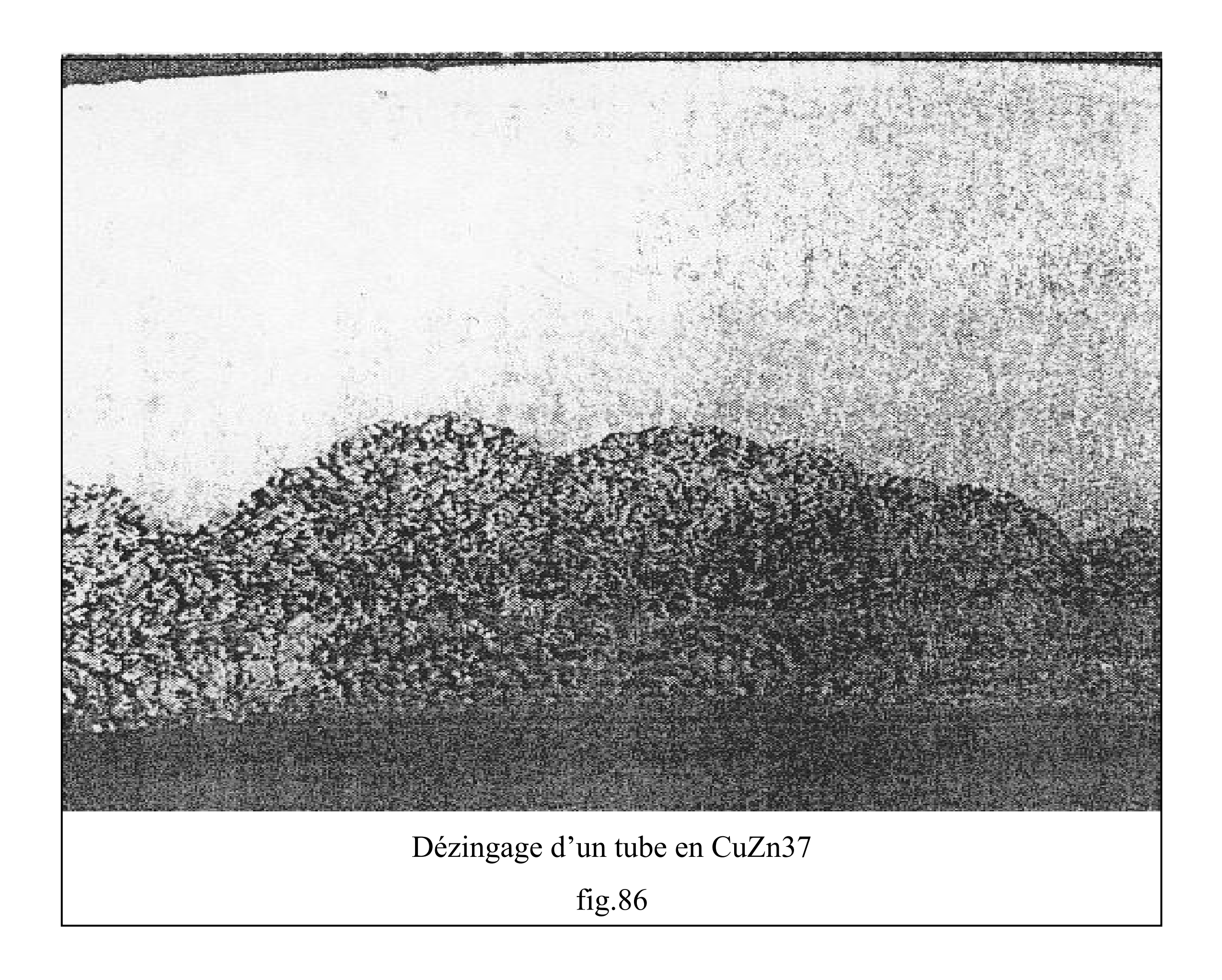
Les laitons ne peuvent pas être durcis (durcissement par traitement thermique). Donc les propriétés mécaniques peuvent être améliorées uniquement grâce au durcissement par déformation (écrouissage).

Fig.85

Le recuit d'adoucissement de ces alliages doit être effectué à des températures basses, car ces alliages ont tendance à la formation de structure à gros grains lors de la recristallisation. Cette tendance diminue avec l'augmentation de la teneur du zinc, les températures de recuit, en général ne doivent pas être choisis supérieures à 500°C.

Les alliages de Cu-Zn corroyés sont considérés comme de bons résistants à la corrosion, où le laiton β possède un bon rendement contre les attaques chimiques que le laiton α.

Une corrosion particulière « dézingage » apparaît dans le cas des alliages avec une teneur en zinc supérieure à 20 %, comme le montre la figure 86, où il y a dissolution, en premier lieu, des cristaux mixtes α.



Dézingage d'un tube en CuZn37

fig.86

Les alliages Cu-Zn sont sensibles contre la corrosion de criques de tension dans l'atmosphère et dans la solution d'ammoniac. Cette forme de corrosion est liée aux contraintes mécaniques internes et externes. Elle peut être évitée grâce au recuit de détente (décompression) à une température d'environ 250°C ou plus.

Les alliages Cu-Zn contenant du plomb sont utilisés surtout pour la fabrication des parties tournantes (boulons, écrous, pièces d'horloges).

Les alliages CuZn40 et CuZn37 sont déformables à froid et servent pour la fabrication d'écrous et de boulons. Les alliages CuZn30 et CuZn20 sont destinés pour la fabrication de conduites d'échangeurs de chaleur, corps, ressorts, conduites de manomètres, etc.

3.6.3.4. Les laitons spéciaux à composants multiples

Les laitons industriels contiennent environ (48 à 50) % Zn et se divisent en laitons homogènes ou laitons α et hétérogènes ou laitons ($\alpha + \beta'$) :

- Laitons homogènes ou laitons α avec une teneur en Cu de 100 à 62,5 % et se prêtent bien au corroyage à chaud et à froid.
- Laitons hétérogènes ou laitons (α + β') avec une teneur en cuivre jusqu'à 56 %. Ils sont peu plastiques à l'état froid et peuvent être soumis au corroyage à chaud.

Les laitons spéciaux sont des alliages à base de Cu et de Zn et alliés avec un ou plusieurs éléments d'addition tels que : Si, Al, Sn, Ni, Mn, Pb, Fe, As. L'introduction des éléments d'alliage, sauf le nickel, diminue la solubilité du zinc dans le cuivre et contribue à la formation de la phase β, c'est pourquoi en général, les laitons spéciaux sont considérés comme des laitons biphasés (α + β').

Le tableau, ci-dessous, donne une idée sut les différents types de laitons spéciaux ainsi que leur composition chimique selon TGL.

Désignation	**Eléments d'alliage %**			**Inclusions en %**						
	Cu	**Zn**	**Composition**	**Al**	**Sn**	**Mn**	**Fe**	**Pb**	**Si**	**Autre**
CuZn40MnPb	**56 à 61**	**Reste**	**0,4 à 2,0 Mn 1,0 à 2,0 Pb**	**0,8**	**0,2**	**-**	**0,6**	**-**	**0,5**	**1,5**
CuZn40Al1	**56 à 61**	**Reste**	**1,0 à 1,5 Al 1,5 à 2,2 Mn**	**-**	**0,2**	**-**	**1,0**	**1,0**	**0,5**	**2,0**
CuZn40Al2Fe1	**56 à 61**	**Reste**	**1,0 à 2,5 Al 0,2 à 3,0 Mn 0,5 à 1,5 Fe**	**-**	**0,1**	**-**	**-**	**0,8**	**0,3**	**1,0**
CuZn35Al1Ni	**57 à 62**	**Reste**	**0,3 à 1,5 Al 1,5 à 2,5 Mn 2,0 à 3,0 Ni**	**-**	**0,1**	**-**	**0,5**	**0,5**	**0,05**	**1,0**
CuZn29Al	**67 à 71**	**Reste**	**0,5 à 2,0 Al 0,3 à 0,7 Mn**	**-**	**0,2**	**1,0**	**0,5**	**0,02**	**-**	**1,0**
CuZn21Al12	**76 à 79**	**Reste**	**1,8 à 2,5 Al 0,03 à 0,05 As+P**	**-**	**0,05**	**0,1**	**0,10**	**0,07**	**0,05**	**0,3**

L'influence des éléments d'alliage sur les caractéristiques des laitons spéciaux se résume comme suit :

a. Le silicium (Si) : C'est l'élément le plus influant. Dans les laitons α, on peut dissoudre jusqu'à 4 % de Si. Sa solubilité diminue dans les cristaux mixtes avec l'augmentation de la teneur en zinc. Le silicium augmente la résistance à la corrosion, la résistance à la rupture, la résistance à la déformation et améliore la qualité de frottement pour des teneurs entre 0,3 et 0,6 % Si. Il y a formation de siliciures qui améliorent les qualités de frottement des liaisons (α + β').

b. L'aluminium (Al) : Il augmente la résistance, la limite élastique, la dureté et la bonne résistance à la corrosion par la formation d'une couche protectrice d'alumine en surface du métal. L'aluminium rend difficile la brasure, elle peut être réussit seulement par l'utilisation de matière fluidisante ou par brasage à l'argent d'une teneur d'environ 2 %.

c. L'étain (Sn) : Sa solubilité dans les laitons α est de 1,5 % à la température de 400°C, mais dans les laitons, on a seulement 0,4 % Sn. Alors que 1 % Sn, donne une excellente résistance à la corrosion, par la formation d'une couche de protection.

d. Le fer (Fe) : La solubilité du fer dans le cuivre dépend de la température et constitue une possibilité de durcissement à chaud. Les premières liaisons du fer agissent fortement sur la formation des grains et améliorent les propriétés mécaniques, (résistance à la traction et dureté). La teneur moyenne est de 0,5 à 1,5 %. Pour avoir une bonne tenue à la corrosion, la teneur en fer ne doit pas être supérieure à 0,5 % car le fer diminue la résistance à la corrosion.

e. Le manganèse (Mn) : Le manganèse agit semblablement comme le fer, sa solubilité dans les cristaux mixtes α est supérieure à celle du fer, permet l'utilisation de l'alliage dans les constructions maritimes en supportant de fortes pressions.

f. Le plomb (Pb) : Techniquement, on utilise des teneurs jusqu'à 3 % Pb. Il facilite l'usinage, dont notamment le décolletage et améliore les propriétés antifriction en restant insoluble sous forme de globules qui fragmentent les copeaux. Ces alliages sont utilisés pour la visserie, la robinetterie et les pièces d'horlogerie.

g. Le nickel (Ni) : On utilise des teneurs allant jusqu'à 3 %. Il donne à l'alliage une résistance mécanique élevée et une bonne résistance à la corrosion dans l'eau douce, l'eau de mer, la vapeur et les acide dilués.

h. Le phosphore et l'arsenic (P,As) : Le phosphore rend les laitons plus fluides. Sa liaison avec l'arsenic augmente le tenue à la corrosion par la formation d'une couche de revêtement. De manière générale, tous les éléments d'alliages, (sauf le plomb), augmentent la dureté et diminuent la plasticité du laiton.

Le tableau, ci-dessous, donne un aperçu sur les propriétés mécaniques des différents types de laitons spéciaux selon TGL.

Désignation	Etat	$\sigma_{0,2}$	R	A	HB	Applications
		(Kp/mm²)		(%)	(Kp/mm²)	
CuZn40MnPb	Barre étirée	20	45	18	130	Cage de roulement
CuZn40Al1	Barre pressée	20	45	15	120	Armatures, bielles de pistons
	Barre étirée	30	50	12	135	
CuZn40Al2Fe	Barre pressée	28	60	12	140	Résistance à la corrosion
CuZn35Al1Ni	Barre pressée	30	50	18	110	Construction navale
CuZn29Al	Tôle douce	10	37	50	75	Ressorts
	Tôle demi-dure	25	45	30	125	Résistance
	Tôle dure	40	55	15	150	à la fatigue
	Tôle très dure	45	60	8	160	et à la corrosion
	Tôle très dure +	50	65	5	170	
CuZn21Al2	Rec. Adoucis.	14	34	50		Condensateurs
	Demi-dur	20	40	40		Construction navale

3.6.3.5. Les bronzes (Alliages Cu-Sn)

Ce sont des alliages composés de Cu-Sn, dont la teneur en Sn est de 3 à 20 %. Jusqu'à 5 % Sn, ils possèdent une couleur rouge et elle passe au jaune à partir de 15 % de Sn. Ils sont utilisés surtout en fonderie grâce à leurs bonnes propriétés de moulage. Ils présentent une bonne tenue à la corrosion, mais de mauvaises qualités d'usinage. Dans la pratique, on utilise uniquement les bronzes avec une teneur en Sn jusqu'à 12 % car les alliages les plus riches en étain sont très fragiles.

Le tableau, ci-dessous donne les différents types de bronzes selon TGL.

Désignation	Composition en %					Autres éléments en %			
	Sn	Zn	Pb	P	Cu	Fe	Pb	Zn	P
CuSn2	1,0 à 2,0	-	-	0 à 0,1	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn3	2,0 à 3,5	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn4	3,5 à 4,5	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn6	5,5 à 7,0	-	-	0 à 0,4	Reste	0,10	0,05	0,3	-
CuSn8	7,0 à 9,0	-	-	0 à 0,4	Reste	0,05	0,05	0,3	-
CuSn4Zn3	3,5 à 4,5	2,7 à 4,0	-	-	Reste	0,05	0,05	-	0,05
CuSn6Zn6	5,0 à 7,0	5,0 à 7,0	-	-	Reste	0,05	0,05	-	0,10
CuSn4Zn4Pb 4	3,0 à 5,0	3,0 à 5,0	3,0 à 5,0	-	Reste	0,05	-	-	0,05

Le diagramme d'équilibre de l'alliage de bronze est donné par la figure 87.

La phase α est une solution solide de l'étain dans le cuivre à réseau CFC. La solubilité limite atteint 15 %. Elle est malléable à chaud et à froid.

Les alliages de ce système forment des composés électroniques du type :

- Phase β (Cu5Sn).
- Phase δ (Cu31Sn8).
- Phase ε (Cu3Sn).
- Phase γ (la nature n''est pas établie).

Le système Cu-Sn présente plusieurs transformations péritectiques et deux transformations de type eutectoïdes. A 588°C, les cristaux de la phase β subissent une décomposition eutectoïde avec formation des phases α et γ, et à 520°C, les cristaux de la solution solide γ se décomposent en α + δ.

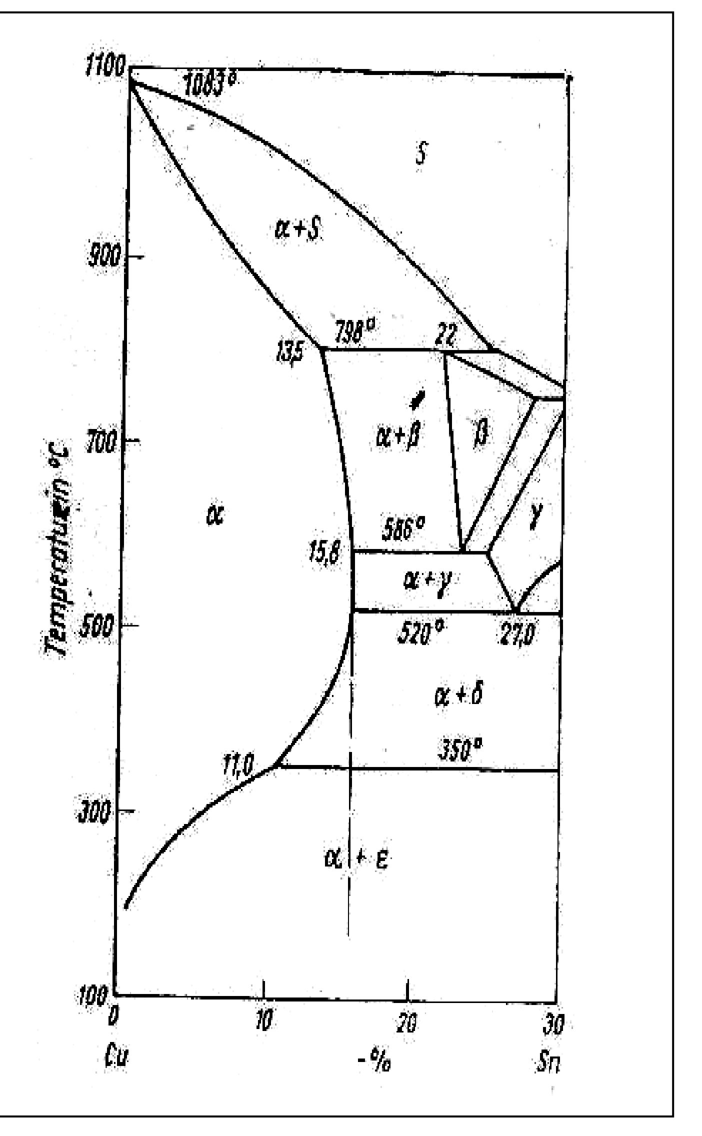


fig.87

A la température d'environ 530°C, la phase δ se décompose en solution solide α et une phase ε. Cependant cette transformation marche seulement dans les conditions d'un refroidissement très lent. Dans la pratique, on utilise seulement les alliages Cu-Sn à moins de 12 % de Sn car les alliages plus riches sont très fragiles à cause de la phase δ.

L'intervalle de température de cristallisation des bronzes à l'étain est très grande (Voir diagramme d'équilibre), il en résulte une tendance à la ségrégation (formation d'une porosité dispersée).

La ségrégation de cristaux peut être aussi observée dans les structures des alliages Cu-Sn moulés, cette dernière. rend difficile le travail par déformation à chaud. Cela est expliqué par le phosphore en excès qui n'est pas lié avec l'oxygène et se trouve sous forme de Cu_3P, et qui forme avec l'eutectique du cuivre un eutectique fusible à 707 °C, ce qui provoque un danger de

rupture à chaud.

Après déformation et recuit, les bronzes titrant à 4 ou 5 % Sn, ont une structure polyédrique et constituent essentiellement une solution solide α. La modification des propriétés mécaniques des bronzes en fonction de la teneur en Sn est donnée sur la figure 88.

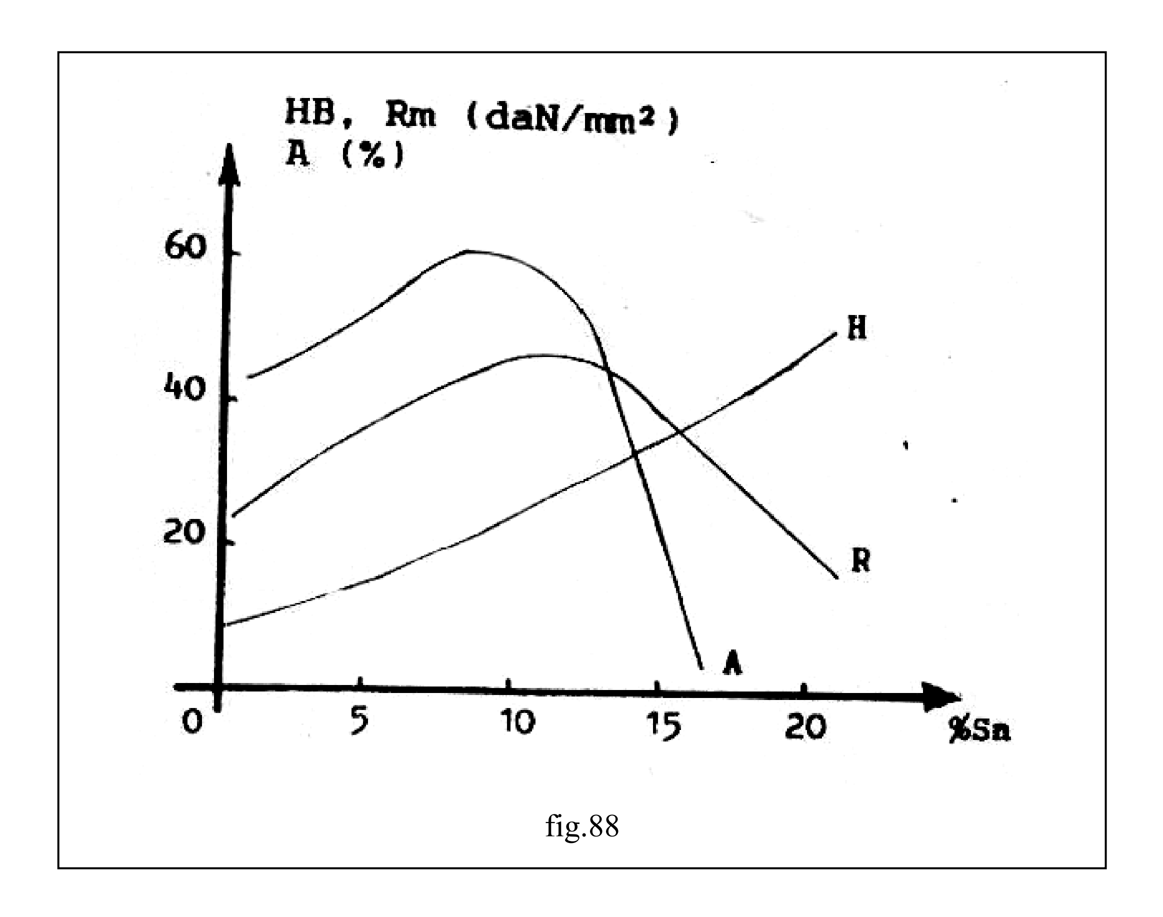


fig.88

La dureté (H) augmente régulièrement avec la teneur en Sn jusqu'à 13 % et s'accentue pour des volumes supérieurs. La résistance mécanique (R) augmente nettement dans le domaine de l'existence de la solution solide α et chute au delà. Quant à l'allongement (A), il conserve son niveau élevé (environ 60 %) et reste constant jusqu'à 13 % Sn et diminue brutalement au delà, à cause de la grande fragilité de la phase δ.

L'homogénéisation de la structure des produits moulés et écrouis se fait avec un recuit à 700°C, suivi d'un refroidissement rapide. La trempe martensitique des bronzes s'opère au dessus de 600°C.

Les bronzes se divisent en deux groupes : les bronzes de corroyage et ceux de fonderie.

a. Les bronzes de corroyage :

La teneur en Sn est de 4 à 6 % et les autres teneurs maximales en P : 0,4 %, en Zn : 4 %, en Pb : 4,5 %. Ils sont élaborés sous formes de barres, plats, fils, aux états écrouis (durs) et recuits (doux). Ils sont destinés pour la fabrication des ressorts et des éléments élastiques. Les bronzes à l'étain, de corroyage, sont constitués de la solution α.

b. Les bronzes de fonderie :

Ils contiennent une grande quantité de zinc, de phosphore et souvent de plomb. Ils possèdent une structuré biphasée, composée de solution solide α et d'inclusions de la phase δ durs et fragiles, qui, généralement font partie de la structure de l'eutectoïde.

Les bronzes à l'étain sont généralement alliés aux Zn, Fe, P, Pb, Ni et à d'autres éléments. Le zinc améliore les propriétés technologiques du bronze et le rend moins cher. Lorsque la teneur en phosphore est supérieure à 0,3 %, il forme la phosphure Cu_3P qui améliore les propriétés élastiques et antifrictions.

Le nickel améliore les propriétés mécaniques, la tenue à la corrosion et la densité des pièces moulées tout en diminuant la ségrégation. Le fer affine le grain, mais dégrade les propriétés technologiques des bronzes, ainsi que la résistance à la corrosion.

L'addition du plomb diminue les propriétés mécaniques des bronzes, mais augmente la densité des moulages, facilite l'usinage et améliore les propriétés antifrictions.

De cette catégorie des bronzes à l'étain avec addition, on distingue :

a. Bronze au phosphore :

La teneur en phosphore est de (0,03 à 0,05) %. Il forme avec le cuivre le composé Cu_3P, dur et fragile et augmente la résistance mécanique. Le phosphore est un élément qui améliore la coulabilité.

b. Bronze au plomb :

Avec une teneur de 1 à 30 % de Pb, le plomb est insoluble dans l'alliage et reste dispersé sous forme de globules. Jusqu'à 7 %, il améliore l'aptitude à l'usinage et à l'étanchéité. Au delà de 7 % et jusqu'à 30 %, les bronzes au plomb sont surtout employés, pour le faible coefficient de frottement qu'ils présentent, pour la fabrication des coussinets et des glissières. On les utilise aussi comme conduites pour l'acide sulfurique.

c. Bronze au zinc ($CuSn_5Zn_4$) :

Le zinc facilite la désoxydation, améliore la résistance à la traction, l'allongement, la coulabilité et la malléabilité. En plus du zinc et jusqu'à 6 % de plomb, il est utilisé en robinetterie, pour les conduites d'eau, de vapeur et de pétrole, ainsi que pour la fabrication des appareils électriques.

d. Bronze au manganèse (1 à 3 % Mn) :

Ce bronze marque une augmentation de la dureté, mais légèrement inférieure qu'avec le phosphore. L'alliage est caractérisé par une grande ténacité.

3.6.4. Les cupro-aluminium (Cu-Al)

La teneur en Al varie de 4 à 14 %. Ils sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et par une résistance élevée à la corrosion marine, à la corrosion sous tension et à la fatigue par corrosion. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication de bagues de toute sorte, de sièges de guidage, de brides, de roues dentées, etc.

La figure 89, ci-dessous, représente le diagramme d'équilibre Cu-Al.

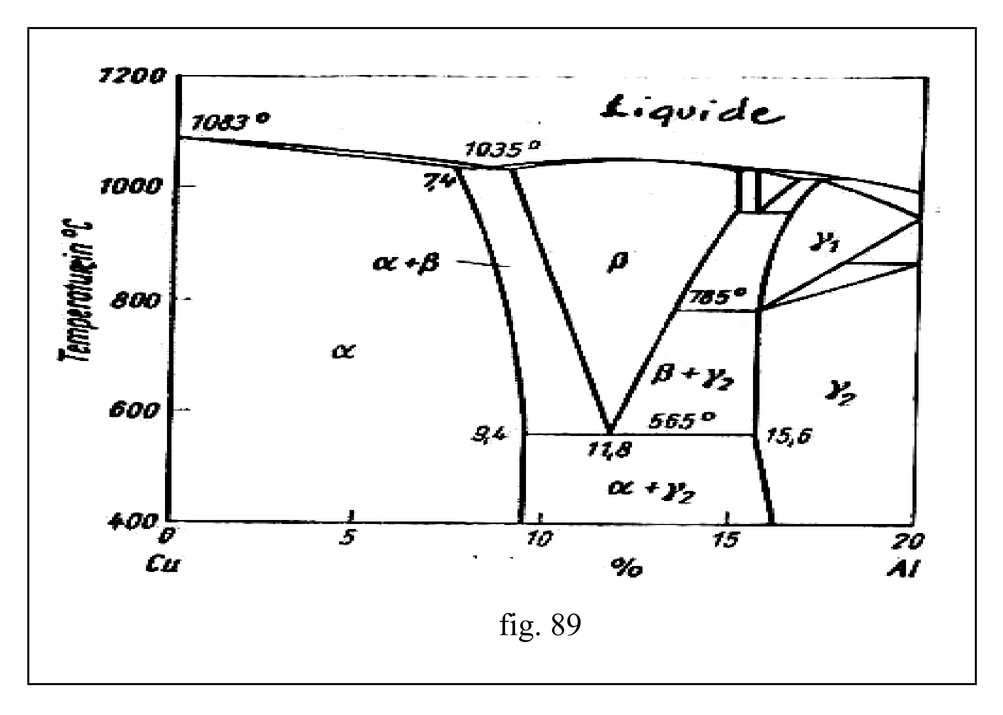


fig. 89

Les alliages titrant jusqu'à 9,4 % d'aluminium sont constitués de cristaux mixtes α. La phase β est une solution solide à base de composé électronique Cu_3Al. Lorsque la teneur en Al dépasse 9 %, on observe la formation de l'eutectoïde $\alpha + \gamma_2$ (γ_2 est le composé électronique $Cu_{32}Al_{19}$).

La phase α est plastique, mais de résistance peu grande, alors que la phase γ possède une dureté et une plasticité très faible.

- Les alliages monophasés α sont malléables à froid.
- Les alliages biphasés $\alpha + \gamma_2$ sont obtenus suite à la transformation eutectoïde suivante :

$$\boldsymbol{\beta \leftrightarrow \alpha + \gamma_2}$$

Les alliages hypoeutectoïdes, composés des phases $\alpha + \varepsilon(\alpha + \gamma_2)$ ont une résistance élevée et une faible plasticité à froid. Par contre au dessus de 565°C, la présence de la phase β permet aux alliages de supporter de grandes déformations.

Les bronzes à l'aluminium, résistent bien à la corrosion et possèdent des propriétés mécaniques et technologiques élevées. Ils se présentent facilement au corroyage à chaud et à froid pour des additions de 7 à 8 % Al. Leurs bonnes propriétés de fonderie permettent de les employer pour toute sorte de moulage.

Le tableau, ci-dessous, donne un aperçu sur l'influence de l'écrouissage à froid (déformation à froid) sur les propriétés mécaniques de deux types de cupro-aluminium.

Propriétés	**$CuAl_4$**		**$CuAl_8$**	
	Doux	**Ecroui**	**Doux**	**Ecroui**
Limite élastique : $\sigma_{0,2}$ (Kp/mm²)	**16**	**73**	**20**	**78**
Résistance à la traction (Kp/mm²)	**42**	**85**	**50**	**95**
Allongement à la rupture : A (%)	**53**	**7**	**50**	**4**
Striction à la rupture (contraction) en %	**65**	**30**	**55**	**40**

L'addition de certains éléments chimiques permet d'améliorer encore les propriétés des cupro-aluminium. Ainsi, la présence du fer dans ces alliages affine le grain et améliore les propriétés mécaniques et antifrictions. Le nickel renforce encore !os propriétés mécaniques et surtout la tenue à la corrosion et à l'usure jusqu'à environ 500°C. Deux types de cupro-aluminium, sont représentés dans le tableau suivant dont la composition chimique est la suivante :

Alliages	% maximum				Produits secondaire en %					
	Al	Mn	Fe	Cu	Mn	Fe	Zn	Pb	Si	P
$CuAl_5$	4 à 6	-	-	Reste	0,5	0,5	0,3	0,3	0,2	0,01
$CuAl_{10}Fe_3Mn1$	9 à 11	1 à 2	2 à 4	Reste	-	-	0,5	0,03	0,4	0,01

3.6.5. Les cupro-nickel (Cu-Ni)

Les alliages Cu-Ni contiennent de 5 à 45% Ni. Le diagramme d'équilibre Cu-Ni comporte une solution solide unique puisque le cuivre et le nickel sont solubles en toutes proportions. Les bronzes au nickel résistent bien à la corrosion par l'eau de mer. Les nuances industrielles sont alliées avec du silicium et du manganèse (Cu-Ni-Si, Cu-Ni-Mn) dans les proportions suivantes :

- Composition de l'alliage Cu-Ni-Si : 0,5 à 4 % Ni, 0,15 à 1 % Si et le reste Cu.
- Composition de l'alliage Cu-Ni-Mn : 20 % Ni, 20 % Si et le reste Cu.

Les alliages contenant plus de 20 % Ni sont très malléables et résistent remarquablement à la corrosion de l'eau de mer. Ils sont utilisés pour la fabrication des monnaies avec 25 % Ni, et surtout pour les tubes condenseurs d'eau de mer.

3.6.6 Le Constantin (55% Cu et 45% Ni)

Cet alliage possède un coefficient de résistivité électrique nul. Sa résistivité est à peu près, indépendante de la température. Il sert à fabriquer des résistances électriques et des pièces d'appareils de mesure.

3.6.7. Les maillechorts (Cu-Ni-Zn)

Les maillechorts sont des alliage de Cu : (40 à 66) %, de Ni : (9 à 32) % et de Zn : (17 à 45) %. Ils ont des propriétés intermédiaires entre celles des laitons et celles des cupronickels. On distingue les alliages monophasés qui sont malléables et les alliages diphasés qui sont facilement usinables et forgeables à chaud.

Les maillechorts sont des alliages blancs, durs et inaltérables que l'on utilise dans la fabrication de pièces d'orfèvrerie, d'instruments scientifiques, des résistances et d'appareillages électriques.

3.6.8. Les cuprosiliciums (Cu-Si)

Ces alliages sont du type $CuSi_3Mn$, $CuSi_2Al_{25}$, qui ont des caractéristiques alliés à une bonne tenue à la corrosion en eau douce et en eau de mer. L'addition jusqu'à 3,5 % de Si avec le cuivre, permet d'augmenter la résistance et la plasticité. L'introduction de Ni et Mn renforce la résistance mécanique et la résistance la corrosion. Les bronzes au Silicium se prêtent bien au corroyage, à l'usinage et au soudage, ils peuvent s'employer pour la fabrication de ressorts et des éléments élastiques des appareils.Il existe d'autres types d'alliage de cuivre de la même famille des cuproliums tels que les cuproplombs et les cuproberylliums.

3.6.9. Propriétés et emplois

3.6.9.1. Le cuivre

Désignation	Symbole	Elaboration	Cu + Ag (%)	P (%)	Propriétés et emplois
Cuivres raffinés	Cu/a1	Affiné par voie électrolytique	99,9	Néant	Haute conductibilité électrique et thermique, impropre au soudage. Emploi en électrotechnique.
	Cu/a2	Affiné par voie thermique	99,9	Traces	Haute conductibilité, impropre au soudage. Emploi en électrotechnique.
	Cu/a3	Affiné par voie thermique	99,75	Traces	Conductibilité non garantie, impropre au soudage. Usages mécaniques.
Cuivre raffiné désoxydé	Cu/b	Affiné par voie thermique ou électrolytique dsoxydé au phosphore	99,9	0,013 à 0,050	Bonne soudabilité, bonne tenue au chauffage en atmosphère réductrice. Usages mécaniques : tubes, pièces embouties ou matricées.
Cuivres raffinés exempts d'oxygène	Cu/c1	Cathodes fondues et coulées à l'abri de l'air. (Cuivre OFHC de commerce)	99,92	Traces	Haute conductibilité électrique, bonne soudabilité. Usages électriques et mécaniques.
	Cu/c2	Cathodes fondues et coulées à l'abri de l'air. (Cuivre OFHC certifié de commerce)	99,96	0,0003 au max.	Mêmes propriétés que Cu/c1, soudable au verre. Usages électroniques et mécaniques.
Cuivre en cathodes	Cu/d	Affiné par voie électrolytique	99,9	Néant	Haute conductibilité. Usages électriques et mécaniques. Elaboration des alliages

3.6.9.2. Les cuivres faiblement alliés

Désignation	Composition	Etat	R	A %	HB	ρ à 20°C	Propriétés et emplois
Cuivre à l'argent Cu Ag	0,3 à 0,1 % Ag	Ecroui ¾ dur	36	12	115	1,72 à 1,76	Température du recuit supérieure à celle du cuivre. Usages électriques : contacts, lames de collecteurs, bobinages, etc.
Cuivre au cadmium Cu Cd	0,7 à 1 % Cd	Ecroui ½ dur	52	6	120	1,9 à 2,1	Grande résistance mécanique, grande dureté, bonne conductibilité. Température du recuit supérieure à celle du cuivre. Emplois : fils téléphoniques, conducteurs pour caténaires, etc.
Cuivre au chrome Cu Cr	0,5 à 0,9 % Cr	Trempe Revenu écroui	52	2 à 5	140	2,1	Grande résistance mécanique après trempe et revenu, grande dureté. Emplois : contacts, électrodes, lames de collecteurs.
Cuivre au béryllium Cu Be	2 % Be 0,4 % Ni ou Co	Trempe et revenu	140	2	160	7 à 8	Très grande résistance mécanique, très grande dureté mais conductibilité électrique médiocre. Emplois : ressorts, pièces de frottement.
Cuivre au tellure Cu Te	0,3 à 0,7 % Te	Ecroui ½ dur	31	12	80	176 à 180	Grande facilité d'usinage, bonne conductibilité, température de recuit plus élevée que celle du cuivre. Emplois : appareillage électrique.

3.6.9.3. Divers alliages fortement alliés

Nature	Usage	Nuance ou composition	Propriétés et emplois
Alliages de nickel	Pour laminage (métal Monel)	Ni + Cu (30 %) + Fe (1 à 2 %) + Mn (1 %) + Al (2,75 %)	Bonne résistance mécanique. Grande résistance à la corrosion. Emplois en marine, industries chimiques.
	Pour fonderie	Ni + Cu + Fe + Mn + Si (4 %)	Mêmes propriétés
	Métal Inconel	Ni + Cr (14 %) + Fe (6 %) +Si (2 %) pour pièces moulées	Grande résistance à l'oxydation à température élevée.
	Ni-Cr	Ni (80 %) + Cr (20 %)	Résistances électriques.
Alliages de zinc ou Zamac Zn + Al ou Zn + Al + Cu	Pour moulage en coquille sous pression	Z-A4G Z-A4U1G Z-A4U3G	Carburateurs, pompes à essence, poignées de portes, articles ménagers, machines à écrire, etc.
	Pour outils d'emboutissage (kayems)	Kayems 1 et 2 Al (4 %) + Cu (3 %)	Poinçons et matrices.
Alliages de magnésium	Pour moulage	G-A6Z3, G-A9, g-A9Z1, etc.	Alliages très légers, utilisées surtout en aviation.
	Pour laminage et forgeage	G-M2, G-A6Z1	Idem

3.6.9.4. Les laitons

Catégorie	Désignation	Composition	Etat	R	A %	Emplois
Laiton en Barre	Cu-Zn 10	Zn : 10 %	X 601	32	20	Barres pou décolletage. Fils, tôles et tubes pour usage généraux.
	Cu-Zn 36	Zn : 36 %	X 601	35	32	Barres pou décolletage. Fils. Profilés. Tôles et tubes.
	Cu-Zn 40	Zn : 40 %	X 601 X 300 ou 500	39 38	20 22	Barres pour forgeage. Tôles et fils. … /…
Catégorie	Désignation	Composition	Etat	R	A %	Emplois
Laiton en barre (suite)	Cu-Zn40 Mn Ni Al	Zn : 40 %	X 601 X 300 ou 500	58 55	10 -	Laiton à haute résistance. Résistance à la corrosion marine.
Laiton au plomb	Cu-Zn36 Pb2	Zn : 35 à 38 % Pb : 1,5 à 2,25 %				Barres et fils pour frappe à froid.
	Cu-Zn36 Pb3	Zn : 32 à 37 % Pb : 2,5 à 3,7 %		32 à 45	6 à 18	Barres et profilés pour décolletage.
	Cu-Zn39 Pb1	Zn : 37 à 41 % Pb : 1 à 2 %				Barres et profilés pour matriçage.
	Cu-Zn39 Pb2	Zn : 36 à 40 % Pb : 1,5 à 3 %		36 à 50	4 à 15	Barres et profilés pour décolletage.
	Cu-Zn41 Pb2 Al	Zn : 38 à 43 % Pb : 1 à 3 % Al : 0,2 à 1 %		45	10	Profilés complexes filés.

3.6.9.5. Les bronzes

Désignation	Composition	Etat	R	A %	Dureté	Emplois
Elaboration : Bronzes laminés						
Cu-Sn 3 Zn 9	Sn : 2 à 4 % Zn : 7,5 à 10 %	Recuit Ecroui Ressort	31 48 à 62 67	40 15 à 5 3	HV : 80 à 110 HV : 140 à 200 HV ≥ 210	Bronzes chrysocales pour usages mécaniques : boulonnerie, visserie, etc.
Cu-Sn 5 Zn 4	Sn : 3 à 5 % Zn : 3 à 5 %	Recuit Ecroui Ressort	32 40 à 60 67	40 20 à 5 3	HV : 80 à 110 HV : 140 à 215 HV ≥ 200	
Cu-Sn 5 P	Sn : 3,5 à 6,5 % P : 0 à 0,33 %	Recuit Ecroui Ressort	30 43 à 60 70	50 26 à 5 2	HV : 80 à 110 HV : 140 à 190 HV ≥ 200	Ressorts. Alliages magnétiques pour frettage de bobines. Coussinets
Cu-Sn 9 P	Sn : 7,5 à 10 % P : 0 à 0,35 %	Recuit Ecroui Ressort	35 54 à 73 78	50 15 à 5 2	HV : 85 à 120 HV : 165 à 205 HV ≥ 200	
Elaboration : Bronzes moulés						
Cu-Sn Pb Zn	Sn ≥ 4,5 %, Zn : 3 à 7 % Pb : 3 à 7 %		-	-	-	Robinetterie. Pièces d'usage courant.
Cu-Sn 5 Pb 5 Zn 5	Sn : 4 à 6 %, Zn : 4 à 6 % Pb : 5 à 6 %		20	10	-	
Cu-Sn 7 Zn 5 Pb 4	Sn : 6,5 à 8 %,Zn: 4 à 7% Pb : 4 à 4,8 %		21	10	-	

Cu-Sn 8 Zn 5	Sn : 7 à 10 % Zn : 1 à 4 %	22	16		Coussinets. Matériel de chemin de fer.
Cu-Sn 10 Zn 1	Sn : 8,5 à 10 % Zn : 0 à 2 %	25	13		Robinetterie sous pression.
Cu-Sn 12 Zn 1	Sn : 10,5 à 12,5 % Zn : 0 à 2 %	23	7	HB : 80	Pièces frottantes, fortes pressions et chocs.
Cu-Sn 12 P	Sn : 10,5 à 12,5 %, Zn : 0 à 2%, P > 0,1 %	20	4	HB : 80	Pièces d'usure.
Cu-Sn 14	Sn:12,5 à 14,5%,	-	-	HB : 100	Forte pression sans chocs
Cu-Sn 16	Sn : 14,5 à 17 %	-	-	-	Ecrasement sans chocs.
Cu-Sn 18	Sn : 17 à 19 %	-	-	-	Grande dureté et limite élastique élevée.

3.6.9.6. Les maillechorts et les cupro-aluminiums

Désignation	Usages	Nuances	Propriétés et emplois
Maillechort Cu + Zn + Ni	En barre pour décolletage	Cu-Zn 26 Ni 9 Pb 1 Cu-Zn 20 Ni 15 Pb 1	Alliage inaltérable. Emplois en orfèvrerie, appareils de physique, ressorts, résistances électriques, décoration, pièces de monnaie, visserie et boulonnerie inaltérables (arcap).
	En barres pour forgeage	Cu-Zn 45 Ni 9, Cu-Zn 45 Ni 15	
	En tôles, bandes, disques	Cu-Zn 28 Ni 9 Cu-Zn 22 Ni 15	
	Pour moulage	Cu-Zn Ni 13, Cu-Zn Ni 18, Cu-Zn Ni 22	
Cupro-aluminium (Bronze d'Al) Cu + Al	Pour moulage en sable	Cu-Al 9 Fe 3, Cu-Al 11 Fe 3 Cu-Al 9 Ni 3 Fe	Grande résistance à l'oxydation, aux agents chimique, à l'eau de mer. Moulage facile. Emplois : soupapes, coussinets, engrenages, etc., pièces de monnaie.
	Pour moulage en coquilles	Cu-Al 9, Cu-Al 9 Fe 3 Cu-Al 9 Ni 3 Fe	
	En tôles, bandes, disques	Cu-Al 6 Cu-Al 8	

3.7. Le magnésium et ses alliages

Le magnésium est un métal alcalino-terreux de couleur gris-blanc, très répandu dans l'écorce terrestre (2 % en masse). On le trouve à l'état naturel en grande quantités sous forme de carbonate de magnésium tels que :

- Magnésite : $MgCO_3$
- Dolomite : $MgCO_3.CaCO_3$.

Le magnésium n'est pas élaboré par la méthode de réduction, à cause de sa grande affinité pour l'oxygène. La réduction du magnésium ne peut s'effectuer qu'à la température d'ébullition, c'est à dire, sous forme d'état de vapeur. A cet effet, le magnésium est produit par le procédé électrolytique.

Les nouvelles introductions de procédés thermiques, comme le procédé silico-thermique (Italie 1938) et le procédé carbo-thermique ainsi que l'élaboration du magnésium à partir de l'eau de mer comme matière première pour l'électrolyse (U.S.A 1939), sont une base pour la production économique du magnésium. Les dépenses énergétiques, pour l'élaboration d'une tonne de magnésium sont estimées à 20 MWh.

Propriétés physiques du magnésium :

- Numéro atomique : 12
- Masse atomique : 24,3
- Température de fusion : 650°C
- Température d'ébullition : 1097°C.
- Masse volumique : 1,74 g/cm^3
- Chaleur massique : 1030 J/Kg.K
- Coefficient de dilatation : (20 à 300)°C : $27,6.10^{-6}$ K^{-1}
- Conductibilité thermique (20°C) : 146 W/m.k
- Résistivité électrique (20°C) : 4,45 µ.Ω.cm.

C'est le plus léger de tous les métaux, stable, susceptible d'un emploi industriel, donc l'intérêt particulier qu'il présente est sa faible densité.

Le magnésium a un réseau hexagonal compact avec :

a = 3,20 Å, c = 5,20 Å et c/A = 1,6235.

Dans les conditions atmosphériques, la tenue à la corrosion est assez bonne, mais le magnésium est instable dans l'eau douce et l'eau de mer. C'est un métal facilement inflammable à l'air, il est

utilisé dans la technique de la photo comme lumière éclair et dans la pyrotechnie comme corps de feu d'artifice.

Le travail du magnésium présente beaucoup de difficultés, car il possède à l'état chaud, une grande capacité de réaction avec l'oxygène. Il a été surtout utilisé, durant la deuxième guerre mondiale, en grande quantité dans les bombes enflammantes pour l'élimination des populations civiles. Le magnésium pur, est peu utilisé dans l'industrie à cause de ses propriétés de résistance, mais il est utilisé sous forme d'alliages, par l'addition de l'AI, Cu, Zn et Zr.

Caractéristiques mécaniques des différents états du magnésium :

Bien que la résistance mécanique soit assez bonne, les propriétés élastiques sont trop faibles pour permettre l'emploi de ce métal.

Etat	Rm (MPa)	Re (MPa)	E (MPa)	HB	A (%)	v
Recuit	170	60	47 000	35	18	0,33
Coulé	115	25	47 000	30	8	0,33
Corroyé	200	90	47 000	40	11,5	0,33

3.7.1. Alliages de magnésium

Les propriétés du magnésium peuvent être sensiblement améliorées par les additions de zinc, d'aluminium, de manganèse et de zirconium. Les alliages de magnésium sont caractérisés par leur faible densité et leur haute résistance. Le plus souvent, on emploie les alliages de magnésium avec l'aluminium (jusqu'à 10 %), le zinc (5 à 6)% , le manganèse (jusqu'à 2,5 %) et 1e zirconium (jusqu'à 1,5%).

Le tableau, ci-dessous, représente la composition et les propriétés de certains alliages de magnésium.

Désignation	Composition en %			$\sigma_{0,02}$ (Kp/mm²)	R (Kp/mm²)	A (%)
	Al	Zn	Mn			
G-Mg Al16 Zn3	5,5 à 6,3	2,5 à 3,3	0,1 à 0,5	8 à 12	16 à 22	3 à 9
G-Mg Al19 Zn	8,0 à 9,0	0,1 à 0,8	0,1 à 0,5	14 à 19	23 à 30	7 à 15
G-Mg Mn2	-	-	1,5 à 2,0	1 à 1,4	7 à 13	3 à 9
Mg Al3 Zn1	2,5 à 3,5	0,5 à 1,1	0,1 à 0,3	16 à 23	24 à 30	10 à 21
Mg Al8 Zn	7,5 à 9,0	0,3 à 0,6	0,1 à 0,3	18 à 27	29 à 35	8 à 17
Mg Mn2	< 0,3	< 0,3	1,4 à 2,3	14 à 25	21 à 31	1 à 11

L'aluminium augmente la coulabilité, le zinc augmente la résistance et le manganèse améliore la tenue à la corrosion Le silicium le cuivre et le fer, comme impuretés, le plus souvent, diminuent la tenue à la corrosion. Le zirconium rend la structure plus fine, seulement dans les alliages ne contenant pas d'aluminium ou de zinc. Les alliages de magnésium sont employés en fonction des caractéristiques particulières suivantes :

- Faible masse volumique (densité).
- Conductibilité thermique élevée, qui permet des échanges thermiques élevées (carters de moteurs, moules d'injection de matières plastiques).
- Capacité d'amortissement élevée, d'où une bonne résistance aux chocs et une diminution du bruit.
- Meilleure usinabilité par rapport aux alliages métalliques.
- Grande stabilité dimensionnelle.

On distingue essentiellement deux catégories d'alliages de magnésium : les alliages de fonderie et les alliages corroyés. Le tableau, ci-dessous, représente les différents types d'alliages de magnésium avec leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques.

Nuance	Composition chimique des éléments en %				Propriétés mécaniques		
	Al	Zn	Mn	Autres	R	R 0,002	A
					(Kgp/mm^2)		(%)
Alliages de fonderie							
МЛ 5	7,5 à 9,0	0,2 à 0,8	0,15 à 0,5	-	16 (25)	9,5 (12)	3 (4)
МЛ 6	9,0 à 10,2	0,6 à 1,2	0,1 à 0,5	-	16 (26)	11 (15)	1,5 (1)
МЛ 10	-	0,1 à 0,7	-	Zr : 0,4 à 1,0 Nd : 2,2 à 2,8	(22)	(12,5)	(3,5)
МЛ 12	-	4,0 à 5,0	-	Zr : 0,6 à 1,1	(27)	(18)	(6)
Alliages de corroyage							
МА1	-	-	1,3 à 2,5	-	21	12	8
МА2-1	3,8 à 5,0	0,8 à 1,5	0,3 à 0,7	-	28	20	12
МА14 (ВМБ5-1)	-	0,5 à 0,6	-	Zr : 0,3 à 0,9	(33,5)	(28)	(9)
ВМ Д-1	-	-	1,2 à 2,0	Th : 2,5 à 3,5	30	25	5

L'aluminium et le zinc forment avec le magnésium des solutions solides et des combinaisons telles que Mg_4Al_3 et $MgZn_2$, comme le montrent les figures 90.

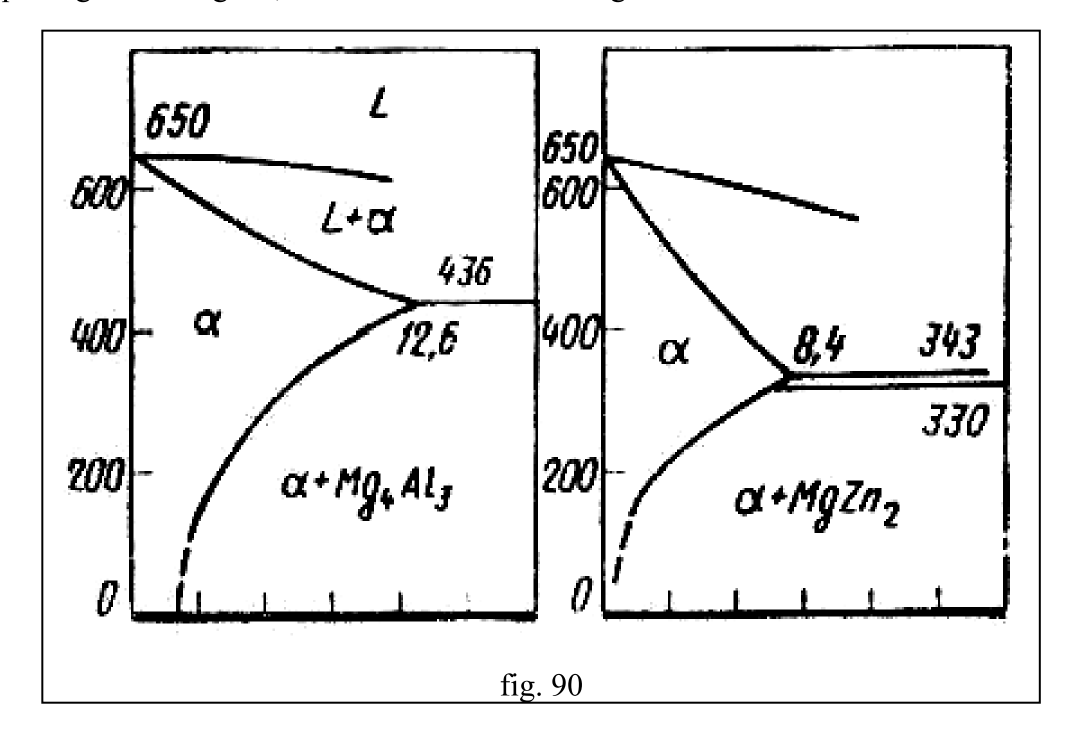


fig. 90

Lorsque les taux d'aluminium et de zinc atteignent 6 ou 7 %, les propriétés mécaniques du magnésium augmentent (fig.91 a et b).

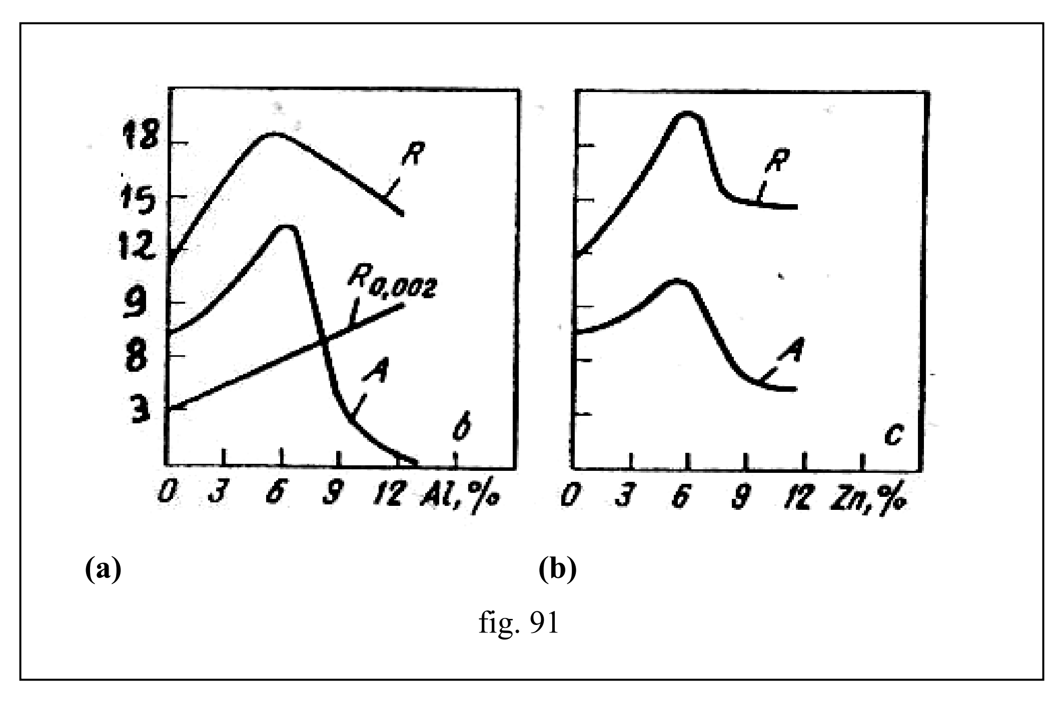


fig. 91

Le manganèse forme avec le magnésium une solution solide α. L'abaissement de la température diminue la solubilité du manganèse dans le magnésium et la solution solide α dégage la phase β, (fig. 92).

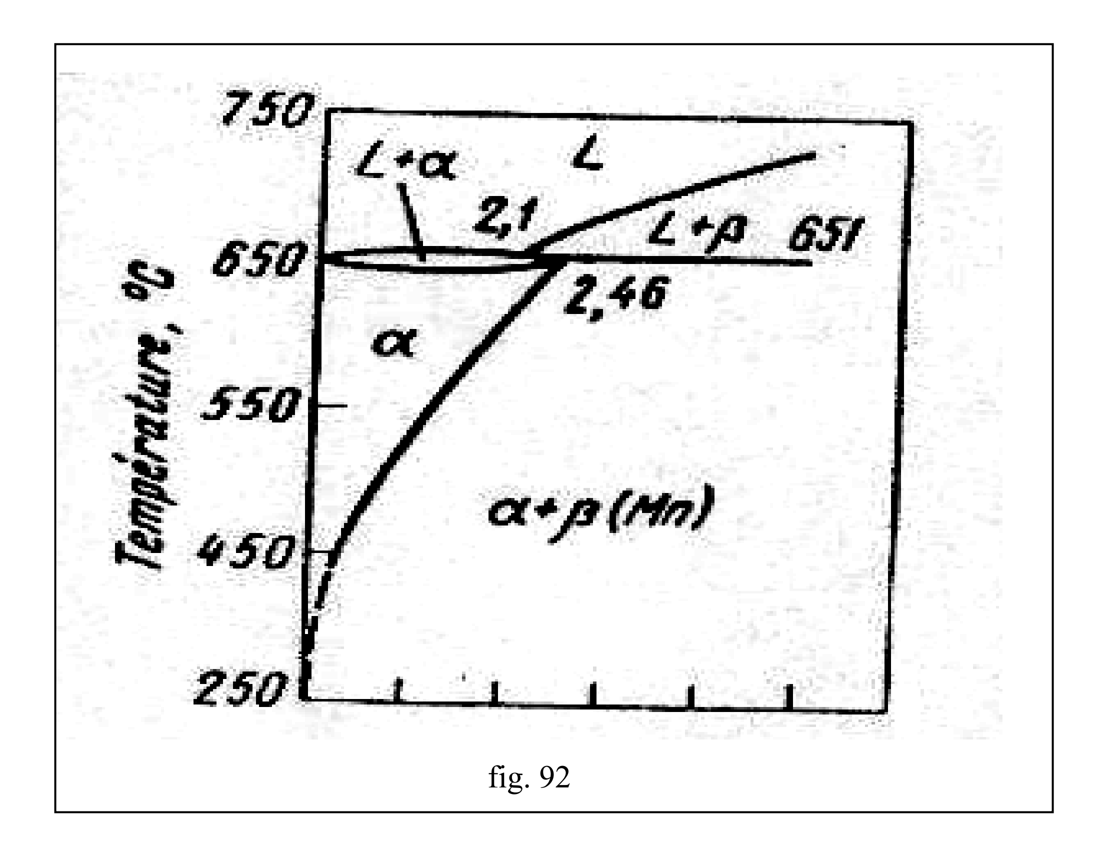
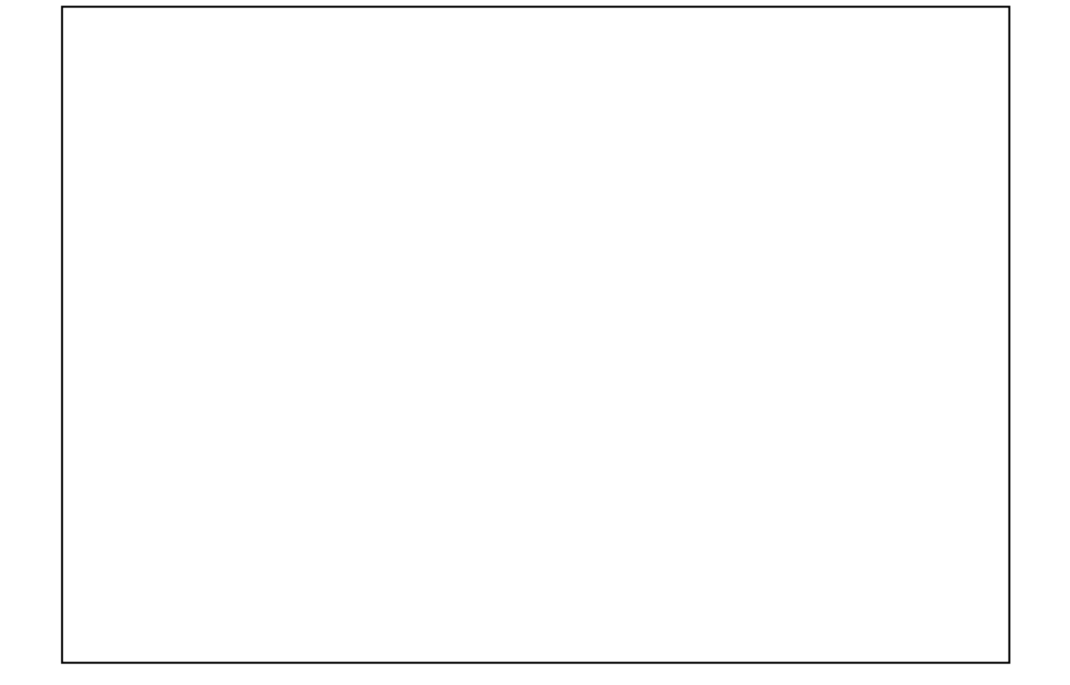


fig. 92

Sans améliorer les propriétés mécaniques, (fig.93), le manganèse augmente la résistance à la corrosion et la soudabilité des alliages de magnésium.



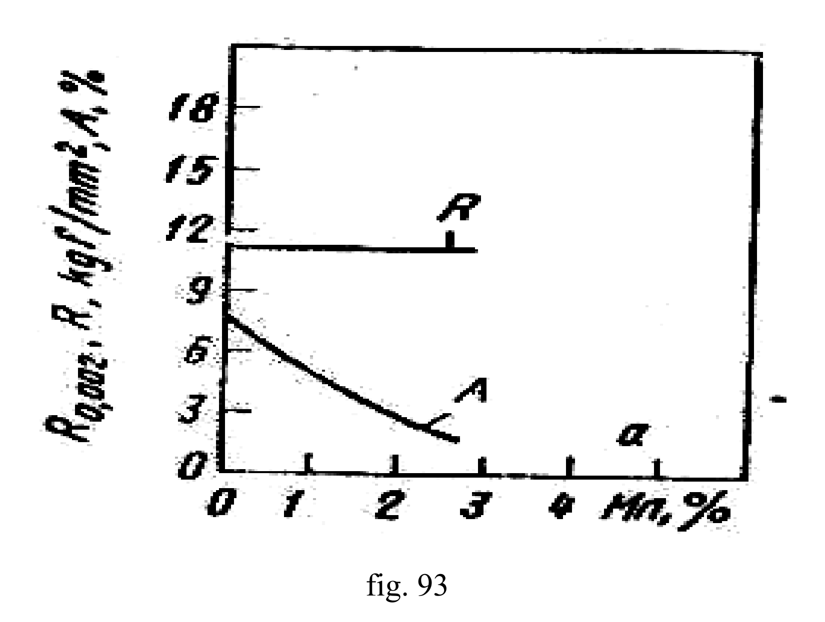


fig. 93

L'augmentation de la tenue à la corrosion est due à la formation d'une pellicule protectrice de l'oxyde hydraté Mn-Mg et à l'élimination du fer.

Le zirconium introduit dans les alliages de magnésium avec le zinc, affine le grain, améliore les propriétés mécaniques et augmente la tenue à la corrosion. Les rares métaux terreux et le thorium élèvent la résistance à chaud.

Une teneur de 0,005 à 0,012 % de béryllium diminue sensiblement l'oxydabilité du magnésium pendant la coulée, le moulage et le traitement thermique. Pour éliminer la ségrégation des éléments d'alliages, on effectue aux alliages de magnésium, soit en lingots ou moulés, un recuit d'homogénéisation de 400 à 420°C, pendant 15 à 30 h. Durant un tel recuit, les phases précipitées aux joints de grains se dissolvent et la composition suivant le volume des grains, est uniformisée, ce qui rend facile le corroyage et améliore les propriétés mécaniques.

Pour éliminer l'écrouissage, les alliages de magnésium sont soumis au recuit de recristallisation à une température de 350°C, plusieurs alliages de magnésium peuvent être durcis par trempe et vieillissement. Les propriétés des alliages de magnésium changent moins, sous l'effet de vieillissement, que celles des alliages d'aluminium. Au cours du vieillissement, la résistance des alliages de magnésium ne peut être augmentée que de 20 à 35 %. Dans ces conditions, la plasticité de l'alliage diminue. C'est pourquoi, il arrive souvent qu'on n'applique que l'homogénéisation qui améliore les propriétés mécaniques des alliages.

3.7.2. Alliages de magnésium de fonderie

Les alliages du système Mg-Al-Zn, possèdent une structure se composant de solution solide et des précipitations de la phase γ (Mg_4Al_3). Le plus usité de ce groupe est l'alliage MЛ5 qui cumule les hautes propriétés mécaniques et les propriétés de fonderie. Il s'emploie pour le moulage en sable, en coquille et sous pression des pièces de grands encombrements et charges tels que carters de moteurs, boites de vitesses, pompes à huile, etc. L'alliage MЛ6 est très employé pour la fabrication des pièces sollicitées par de grandes charges, à cause de ses bonnes propriétés de fonderie.

Les propriétés mécaniques de ces alliages peuvent être élevées par homogénéisation à 420°C pendant 12 à 24 h au chauffage. Les particules des phases excédentaires se dissolvent et le refroidissement à l'air fixe une solution solide homogène. Le vieillissement à des températures de 175 à 190°C pendant 4 à 8 h, leur donne une grande valeur de la charge de rupture et de la limite d'élasticité.

L'alliage MЛ10 est un alliage résistant à chaud, il est très utilisé dans le moulage des pièces travaillant aux températures allant jusqu'à 300°C. La résistance à chaud est obtenue grâce à la formation d'une solution solide de néodyme et de zirconium dans le magnésium et le dépôt de particules $Mg_9N\alpha$. L'alliage MЛ12 a pour élément principal le zinc. Le zirconium est additionné à l'alliage à titre d'inoculant pouf affiner le grain. Il est employé pour le moulage des pièces imposant une herméticité rigoureuse et une haute résistance dans les conditions de chocs.Lors de l'élaboration et du moulage des alliages de magnésium, on prend des mesures spéciales pour prévenir l'inflammation.

- La fusion est effectuée dans des creusets de fer sous flux.
- Pendant la coulée, le jet de métal est saupoudré de soufre qui empêche le métal de prendre feu.
- Pour affaiblir l'oxydation, on ajoute au sable de moulage des additions spéciales (exemple : les fluorures d'aluminium).
- Pour obtenir un métal de qualité, on le soumet à une forte surchauffe.

3.7.3. Alliages de magnésium de corroyage

Leur élaboration s'effectue sous forme de barres, plats, profilés laminés à chaud, ainsi que des pièces de forme et d'estampage.Les alliages de magnésium ont un réseau hexagonal et sont donc peu plastiques aux basses températures, car le glissement ne se produit que suivant les plans

(0001). Au chauffage, apparaissent des plans de glissement supplémentaires (1011) et (1120) et la plasticité s'accroît, c'est pourquoi le corroyage se fait à des températures élevées. L'alliage MAI possède une plasticité élevée, une bonne soudabilité et une bonne tenue à la corrosion mais de faible résistance. L'introduction de 0,2 % de cérium (Ce), affine le grain et améliore les propriétés mécaniques et le corroyage à froid. L'alliage MA2-1 possède des propriétés mécaniques élevées, une bonne plasticité et une bonne soudabilité, il est susceptible de corrosion sous tension. Il se prête à toutes Ies modalités d'estampage et son laminage ne présente pas de difficultés.

L'alliage MA14 se distingue par des propriétés mécaniques accrues, résiste à chaud et résiste à la corrosion sous tension. Parmi les inconvénients que présente cet alliage, il y a son aptitude à la fissuration au laminage à chaud et sa mauvaise soudabilité. L'alliage BMAI, additionné de thorium, est un alliage résistant à chaud. Il est prévu pour le service de longue durée, aux températures allant jusqu'à 350°C, cet alliage se prête bien au filage, au soudage et n'est pas susceptible de corrosion sous tension.

Les alliages de magnésium, grâce à leur résistance élevée, sont largement utilisés dans la construction aéronautique, (roues et fourchettes de châssis, bords d'attaque de l'aile, leviers de toute sorte, boîtiers des appareils, verrières et portes de cabines), dans la technique des fusées, (corps des fusées, carénages avant, réservoir de combustible et d'oxygène, stabilisateur), dans la construction des automobiles, (carters de moteurs, boites de vitesses), dans l'électrotechnique et la radiotechnique, (corps des appareils, des téléviseurs) et dans l'industrie du textile (bobines, canettes).

La propriété du magnésium d'absorber les neutrons thermiques et ne pas interagir avec l'uranium fait que ces alliages s'emploient dans la fabrication des gaines des cartouches des piles atomiques. Pour parer à la faible tenue à la corrosion des alliages de magnésium, ils sont soumis à l'oxydation et la surface oxydée est ensuite couverte de vernis.

3.8. Le zinc et ses alliages

Le zinc est un métal blanc bleuâtre extrait de la blinde de zinc (ZnS), du carbonate de zinc ($ZnCO_3$) etc. Il représente 0,01 % en masse dans l'écorce terrestre. Il cristallise dans le système hexagonal et il est caractérisé par le fait que la grosseur du grain est proportionnelle à la pureté et à la température. Les principales caractéristiques du zinc sont :

- Numéro atomique : 30.

- Masse atomique : 65.
- Température de fusion : 419°C.
- Température d'ébullition : 906°C.
- Masse volumique : 7,13 g/cm^3.
- Coefficient de dilatation : 29.10^{-6} K^{-1}.
- Conductibilité thermique (20°C) : 113 W/m.k.
- Résistivité électrique (20°C) : 5,91 µ.Ω.cm.
- Chaleur massique (20°C) . 382 J/kg.k.

Le zinc est obtenu soit par la voie sèche par réduction de l'oxyde de zinc avec le carbone ou par voie humide par électrolyse.

Le zinc est surtout utilisé pour la protection des surfaces des pièces d'aciers (zingage, galvanisation). Les impuretés principales qui rentrent dans la composition du zinc sont : le plomb, le cadmium, le fer, l'étain et le cuivre. Voir le tableau ci-dessous, relevant les compositions chimiques du zinc. Quant à la teneur des impuretés, elle doit être très limitée.

Désignation	Eléments étrangers en %				
	Pb	Cd	Sn	Fe	Cu
Zn 99,995	0,003	0,002	0,001	0,002	0,001
Zn 99,99	0,005	0,003	0,001	0,003	0,001
Zn 99,975	0,015	0,005	0,001	0,007	0,001
Zn 99,95	0,02	0,014	0,001	0,015	0,002
Zn99,9	0,05	0,02	0,002	0,04	0,002
Zn 98,7	1,2	0,20	0,005	0,05	0,005
Zn 98,5	1,4	0,20	0,005	0,05	0,020
Zn 97,5	2,3	0,20	0,11	0,10	0,05
U-Zn 96,0	1,8	0,3	1,0	0,4	0,5

L'utilisation du zinc est essentiellement basée sur :

- Sa résistance à la corrosion atmosphérique, car le zinc se recouvre d'une couche protectrice de carbonate basique, d'où son emploi dans les toitures, les couvertures, etc.

- Ses propriétés électrochimiques qui permettent au zinc d'assurer la protection des métaux sur lesquels il est déposé (galvanisation, zingage).

Le zinc est malléable est peu résistant (Rm = 100 à 200 N/mm^2), mais les propriétés mécaniques sont améliorées par de faible addition en cuivre (0,5 %) et de titane (0,l %). Ces derniers augmentent le durcissement en formant des solutions solides et en affinant les grains.

- Rm > 170 N/mm^2
- Re > 110 N/mm^2
- A = 50 %
- E = 93 000 N/mm^2

Les propriétés mécaniques du zinc et de ses alliages se dégradent à partir de 100°C à cause du phénomène de fluage.

3.8.1. Les alliages de zinc

Contrairement au zinc pur, tous les alliages de zinc sont des alliages de fonderie (en particulier la fonderie sous pression). Ce sont principalement des alliages Zn-Al avec des additions de cuivre et de magnésium.

- L'aluminium améliore la coulabilité et les propriétés mécaniques. Cependant la résilience devient très faible vers 5 % .d'Al.
- Le cuivre améliore la dureté et la charge à la rupture mais sa teneur reste en général limitée à 1 % à cause du phénomène du durcissement structural qui provoque des variations dimensionnelles.
- Le magnésium, inférieur à 0,06 % joue un rôle durcissant, mais diminue la coulabilité.
- Le plomb, le cadmium et l'étain sont des impuretés néfastes pour la résistance à la corrosion. La figure 94 représente le diagramme d'équilibre Zn-Al.
-

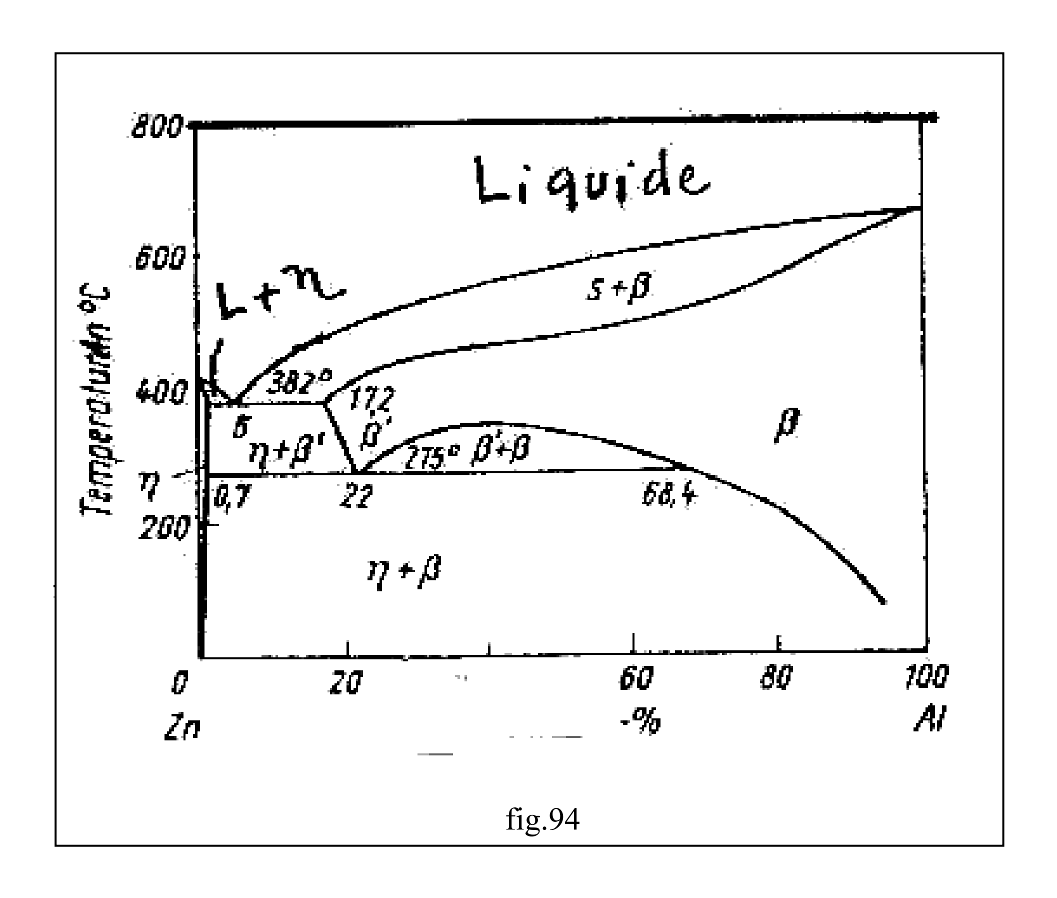


fig.94

Le diagramme (fig. 94) comporte :

- Une solution solide η (0,05 % à 20°C et 1,15 % à 382°C).
- Un point eutectique à 382°C.
- Un point monotectoïde à 275°C et 22 % Al

Après solidification d'un alliage à 4 % Al, on a une structure se composant des phases η et β' (22% Al) avec le réseau cubique à faces centrées. Avec la diminution de la température, diminue la solubilité de l'aluminium dans la phase η et au dessus de 275°C, la phase β' se décompose eutectoïdiquement en cristaux η et cristaux pauvres en zinc β. Avec cette décomposition, il y a changement du volume (transformation → influence sur la stabilité dimensionnelle), variation de la conductibilité électrique et densité. La variation dimensionnelle peut aller jusqu'à 0,08 %.
Dans les alliages ZnAlCu où la présence d'une troisième phase, la phase T (≈ 55° % Cu, ≈ 30 % Al et ≈ 15 % Zn), pour laquelle, on a une augmentation du volume.

Les différents types d'alliages de zinc sont désignés sur le tableau suivant.

Nuances	Al (%)	Cu (%)	Mg (%)	Autres (%)	Rm (MPa)	A (%)	HB
Z-A4G	4,0	0,05	0,05	Fe < 0,10 Pb < 0,005	280	5	-
Z-A4U1G	4,0	1,0	0,05	Cd < 0,005 Sn < 0,002	340	4	-
Z-A4U3G	4,0	3,0	0,05	-	230	1,5	110
Z-A4U3G2	4,0	3,0	2	-	190	0,5	150
Z-A12U1G	12,0	1,0	0,02	-	350	4	-

Alliages de zinc à 4 % Al :

La norme définit deux types d'alliages Z-A4G (zamak 3) et Z-A4U1G (zamak 5). La basse température de coulée, permet la réalisation de pièces de grande précision par fonderie sous pression.

Alliages de zinc à 4 % Al et 3 % Cu :

Ces alliages (kayeaux), sont dérivés de l'alliage Z-A4U1G, ils ont de bonnes propriétés de fonderie mais également une dureté et une résistance à l'usure beaucoup plus grande.

Leur emploi est destiné à la réalisation par fonderie, d'outillages complexes de presses, de matrice, de poinçons, ou de moules pour l'industrie des matières plastiques.

Alliages de zinc à 12 % Al :

Ces alliages (ILZR0I2) ont une excellente coulabilité et sont insensibles à la vitesse de refroidissement, ce qui permet de les mouler suivant tous les procédés, en particulier, en sable. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces prototypes ou de petites séries.

Alliages de zinc à 35 % Al :

Ce sont des alliages contenant 2,5 à 5 % de cuivre, utilisés dans des organes de frottements. Leur structure dendritique fine permet de refaire un film d'huile en surface.

Les sulfures de zinc et l'oxyde de zinc font partie des substances luminescentes, c'est à dire des substances capables d'émettre, à froid, de la lumière sous l'action d'une énergie radiante ou celle d'un flux d'électrons. Ce phénomène trouve de nombreuses applications tels que l'analyse par luminescence, la lampe luminescente d'éclairage, les écrous luminescent pour tubes cathodiques, etc.

L'analyse par luminescence est une technique très sensible, qui est appliquée en contrôle non destructif, elle permet entre autres :

- De déceler les différences entre les objets apparemment identiques.
- De mettre en évidence les défauts microscopiques dans les pièces métalliques.
- De prospecter les gisements de pétrole, de bitumes et les minerais d’uranium.
- De déterminer la nature des taches en criminologie et l’authenticité des documents.

BIBLIOGRAPHIE

1. Einfuhrung in die werkstoffwissenschaft, Prof. Dr. W.Schatt, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1973.
2. Werkstoffkunde stahl und eisen I,.Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1971.
3. Matériaux, J.Lignon et M.Mijon, édition librairie Delagrave, 1967.
4. Werkstoffkunde stahl und eisen II, Eckstein, édition Veb, Deutscher Verlag Leipzig, 1972.
5. Matériaux, tome 1 et 2, N.Bouaoudja, édition OPU, 1992.
6. Métallographie, Schuman, édition Veb Deutscher Verlag Leipzig, 1975.
7. Métallurgie, élaboration des métaux, C.Chaussin et G.Hilly, édition Dunod Paris, 1972.
8. Métallographie et traitements thermiques des métaux, I.Lakhtine, édition Mir Moscou, 1978.
9. Giessereitechnik, R.Helmut, édition Fur Hochschulwesen Karlmarx Sstadt, 1976.
10. Technologie professionnelle générale, A.Castel et A.Dupont, édition Desfarges Paris, 1980.
11. Matériaux et Corrosion, édition Masson Paris, 1989.

S O M M A I R E

